

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Experimentální měření změn šíření
energie v SM optických vláknových
couplerech vlivem výkonového
a tepelného namáhání.**

**Experimental measurements of changes
in the energy spread of SM fiber optic
couplers due to power and thermal
stress.**

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Marek Janovský

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Experimentální měření změn šíření energie v SM optických vláknových couplerech vlivem výkonového a tepelného namáhání.
Experimental measurements of changes in the energy spread of SM fiber optic couplers due to power and thermal stress.

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Výkonové a tepelné namáhání fotonických prvků tvoří základ pro studium jejich urychleného stárnutí. Pracoviště řeší tuto problematiku v několika projektech. Proto řešte následující úkoly:

- 1.Charakterizujte základy šíření elektromagnetické vlny a optického výkonu v optice.
- 2.Popište vliv výkonového a tepelného zatěžování na urychlené stárnutí pasivních optických prvků.
- 3.Změřte změny šíření energie módu LP01 SM optických vláknových couplerů po výkonovém a následně tepelném namáhání.
- 4.Změřte změny šíření energie módu LP01 SM optických vláknových couplerů po tepelném a následně výkonovém namáhání.
- 5.Analyzujte a porovnejte dosažené hodnoty měření. Ovlivní pořadí namáhání pozorované vlastnosti pasivních optických prvků?

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1]DERICKSON, Dennis, Fiber optic test and measurement, United States: Prentice-Hall, 1998. 642 s. ISBN 0-13-534330-5.
- [2]ERSOY, Okan K., Diffraction, fourier optics and imaging, United States: John Wiley & Sons, 2007. 413 s. ISBN 0-471-23816-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

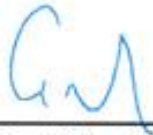
Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 1. dubna 2017

Janovský

Rád bych poděkoval panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc. za odbornou pomoc při vytváření této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Františku Perecárovi za cenné rady, vedení v laboratoři, nekonečnou ochotu, trpělivost a přátelský přístup. Také děkuji panu Ing. Lukáši Bednárkovi za pomoc v laboratoři.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo získat nové poznatky ohledně problematiky stárnutí optických couplerů. Nejprve jsou popsány parametry geometrie optického svazku. Na základě těchto parametrů, konkrétně efektivní hodnoty MFD a FWHM, bylo provedeno měření. V další kapitole je uveden princip fungování optického coupleru, jak se vyrábí a jeho přenosové parametry. Čtvrtá kapitola popisuje různé způsoby urychleného stárnutí. Konkrétně se jedná o stárnutí vlivem tepla, vysokého optického výkonu, gama záření, mechanického namáhání a vodíku. V praktické části je popsán způsob zatěžování optických couplerů Optokon a Gezhi, konkrétně teplem a vysokým optickým výkonem. Dále je zde uvedena metoda měření efektivních hodnot MFD a FWHM. V šesté kapitole se nachází analýza získaných výsledků po tepelném a výkonovém zatížení.

Klíčová slova: Optický coupler; urychlené stárnutí; namáhání; tepelné stárnutí; vysoký optický výkon; MFD; FWHM.

Abstract

The aim of this master's thesis is to obtain new knowledge about the issues of optical couplers aging. First, geometrical parameters of the optical beam are described. Based on these parameters, specifically the MFD and FWHM, measurements were made. In the next chapter is presented the principle of the optical couplers, how they are produced and their transmission parameters. The fourth chapter describes various ways of accelerating aging. In particular it is aging due to heat, high optical power, gamma radiation, mechanical stress and hydrogen. The practical part describes some methods of stressing of Optokon and Gezhi optical couplers by heat and power stress. Here is also described the method of measuring the effective values of MFD and FWHM. The sixth chapter analyzes the results obtained after heat and power stress.

Key Words: Optical coupler; accelerated ageing; loading; thermal aging; high optical power; MFD; FWHM.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	14
1 Úvod	16
2 Teoretický popis základních parametrů	17
2.1 Šíření světla ve vlákne	17
2.2 NA - Numerická apertura	18
2.3 Vidy v optickém vlákne	19
2.4 Gaussovský svazek	20
2.5 MFD - Průměr módového pole	21
2.6 FWHM - Full Width at Half Maximum	22
2.6.1 FDHM - Full Duration at Half Maximum	23
2.7 Rozměry jádra optického vlákna	23
2.8 Kruhovitost optického svazku	24
3 Optické couplery	25
3.1 Typy couplerů	26
3.1.1 FBT couplery	27
3.1.2 PLC couplery	27
3.2 Přenosové parametry coupleru	28
3.2.1 Dělicí poměr	28
3.2.2 Vložné ztráty (Insetion loss)	28
3.2.3 Celkové ztráty (Excess loss)	29
3.2.4 Homogenita ztrát (Uniformity)	29
3.2.5 Útlum zpětného odrazu (Return loss)	30
3.2.6 Směrovost (Directivity)	30
4 Stárnutí optických vláken a optických prvků	32
4.1 Umělé stárnutí vlivem tepla	32
4.2 Umělé stárnutí vlivem vysokého optického výkonu	34
4.3 Umělé stárnutí vlivem gama záření	35
4.4 Umělé stárnutí vlivem mechanického namáhání	36
4.5 Umělé stárnutí vlivem vodíku	36

5	Měření	37
5.1	Urychlené stárnutí vlivem vysoké teploty	37
5.1.1	První způsob zatěžování teplem	38
5.1.2	Druhý způsob zatěžování teplem	39
5.1.3	Arrheniova rovnice	39
5.2	Urychlené stárnutí vysokým výkonem	40
5.3	Urychlené stárnutí vlivem vysoké teploty a výkonu	42
5.4	Princip měření MFD a FWHM	42
5.4.1	Měření pomocí BP109-IR	42
5.4.2	Jiné možnosti měření	44
5.4.3	Program Thorlabs Beam	44
5.5	Měřicí pracoviště	47
5.5.1	Měření s nestabilním laserem	47
5.5.2	Měření se stabilním laserem při kontinuálním tepelném zatěžování	48
6	Analýza získaných výsledků	50
6.1	Teplotní zatížení čínského coupleru Gezhi	51
6.2	Výkonové zatížení coupleru	53
6.3	Teplotní a následně výkonové zatížení	54
6.4	Výkonové a následně tepelné zatížení	56
6.5	Diskuze	57
7	Závěr	59
	Literatura	61
	Přílohy	65
A	Grafy naměřených hodnot	65
A.1	Teplotní zatížení čínského coupleru Gezhi	65
A.2	Měření s nestabilním laserem - výkonové zatížení	66
A.3	Měření s nestabilním laserem - tepelné zatížení	67
A.4	Zatížení teplem a následně výkonem	68
A.5	Zatížení výkonem a následně teplem	70
B	Tabulky naměřených hodnot	72
C	Obsah přiloženého CD	91

Seznam použitých zkratk a symbolů

Σ	– Suma
$^{\circ}$	– Úhlový stupeň
$^{\circ}\text{C}$	– Jednotka stupeň Celsia
2D	– Dvourozměrný prostor
3D	– Trojrozměrný prostor
APC	– Angled Physical Contact, broušení konektoru
c	– Rychlost světla, 299 792 458 [m/s]
CCD	– Charged Coupled Device
CMOS	– Complementary Metal-Oxide Semiconductor
Co	– Kobalt
CW	– Continuous Wave
ČSN EN	– Technická norma
d	– Průměr vlákna [μm]
dB	– Jednotka decibel
DC	– Double-clad vlákno
EDFA	– Erbium Doped Fiber Amplifier
eV	– Jednotka elektronvolt
FBT	– Fused Bionic Taper
FDHM	– Full Duration Half Maximum
fs	– Femtosekunda, jednotka pro délku pulsu
FWHM	– Full Width at Half Maximum
Gy	– Jednotka Gray, jednotka dávky záření
Hz	– Jednotka Hertz
InGaAs	– Indium Gallium Arsenide
J	– Jednotka joule, jednotka práce
Kg	– Jednotka kilogram
LI	– Low Index
LP	– Linearly Polarized modes
MFD	– Průměr módového pole
MM	– Mnohavidové vlákno
n	– Index lomu světla [-]
NA	– Numerická apertura [-]
OTDR	– Optical Time Domain Reflectometry
Pa	– Jednotka Pascal
PLC	– Planar Lightwave Circuit
POF	– Polymerové optické vlákno

SI	– Skokový index lomu
SM	– Jednovidové optické vlákno
USB	– Universal Serial Bus
UV	– Ultraviolet, ultrafialové záření [kLy]
W	– Jednotka Watt
WDM	– Wavelength Division Multiplexer, vlnový multiplex
θ	– Úhel dopadu
λ	– Vlnová délka [m]
π	– Ludolfovo číslo
σ^2	– Rozptyl
ω	– Omega

Seznam obrázků

1	Šíření světelného paprsku v optickém vlákně	17
2	Navázání paprsku do optického vlákna [3]	18
3	Módy LP v optickém vlákně [4]	19
4	Závislost normalizované frekvence na výkonu v jádře a plášti vlákna pro několik typů módů	20
5	Gaussův svazek $f(t)$	20
6	Energie šířící se v jádru a plášti	21
7	Zobrazení MFD při měření coupleru na osách x a y pro mód LP_{01}	22
8	Zobrazení FWHM při měření coupleru na osách x a y pro mód LP_{01}	22
9	Srovnání velikostí plastových a skleněných vláken [9]	23
10	Zobrazení vazební oblast u coupleru se čtyřmi porty[12]	25
11	Coupler s dvěma výstupními větvemi a stejným dělicím poměrem	26
12	Výrobní postup FBT coupleru	27
13	Zobrazení vlnovodu PLC coupleru	28
14	Grafické znázornění výpočtu vložných ztrát	29
15	Grafické znázornění výpočtu celkových ztrát	29
16	Grafické znázornění výpočtu útlumu zpětného odrazu	30
17	Grafické znázornění směrovosti	31
18	Srovnání ferulí před (bílá) a po vlivu gama záření (černá) [7].	36
19	Elektrická trouba Concept ET 5050	37
20	Coupler Gezhi vlevo a Optokon vpravo	37
21	Poškozený konektor po čtvrtém tepelném zatížení	38
22	Čínský coupler Gezhi prohnutý po 3771 hodinách namáhání teplem	40
23	EDFA zesilovač - První a druhý stupeň[39]	41
24	Hlavní část zařízení Thorlabs BP109-IR	43
25	Mobilní hlava zařízení BP109-IR	43
26	Vzdálenost šterbiny a fotodiody v mobilní hlavě zařízení BP109-IR	44
27	Nastavení parametrů v programu Thorlabs Beam	45
28	Rozložení energie paprsku na ose X a Y v programu Thorlabs Beam	46
29	2D a 3D rozložení energie v programu Thorlabs Beam	46
30	Blokové schéma měření s nestabilním laserem	47
31	Foto pracoviště při měření couplerů s nestabilním laserem	47
32	Blokové schéma měření měření se stabilním laserem při kontinuálním tepelném zatěžování	48
33	Foto pracoviště při měření se stabilním laserem při kontinuálním tepelném zatěžování	48
34	Stabilní laserové zdroje pracující na vlnových délkách 1580,317 nm a 1309,25 nm	49

35	Měření MFDeff ve vzdálenosti 0 cm	50
36	Měření MFDeff ve vzdálenosti 1 cm	50
37	Porovnání laserového paprsku ve vzdálenosti 0 a 1 cm v 3D	51
38	Gezhi - MFDeff - 0 cm	51
39	Gezhi - MFDeff - 0 cm	51
40	Gezhi - MFDeff - 0 cm	52
41	Gezhi - MFDeff - 0 cm	52
42	Gezhi - MFDeff - 1 cm	52
43	Gezhi - MFDeff - 1 cm	52
44	Gezhi - MFDeff - 1 cm	52
45	Gezhi - MFDeff - 1 cm	52
46	Gezhi - Měření MFDeff ve vzdálenosti 1 cm pro 4. větev	53
47	Nestabilní laser - 0 cm	53
48	Stabilní laser - 1 cm	53
49	Opto - MFDeff - 0 cm	54
50	Opto - MFDeff - 0 cm	54
51	Opto - MFDeff - 0 cm	54
52	Opto - MFDeff - 0 cm	54
53	Opto - FWHMeff - 1 cm	55
54	Opto - FWHMeff - 1 cm	55
55	Opto - FWHMeff - 1 cm	55
56	Opto - FWHMeff - 1 cm	55
57	Opto - MFDeff - 1 cm	55
58	Opto - MFDeff - 1 cm	55
59	Opto - MFDeff - 1 cm	56
60	Opto - MFDeff - 1 cm	56
61	Opto - FWHMeff - 1 cm	56
62	Opto - FWHMeff - 1 cm	56
63	Opto - FWHMeff - 1 cm	56
64	Opto - FWHMeff - 1 cm	56
65	Opto - MFDeff - 1 cm	57
66	Opto - MFDeff - 1 cm	57
67	Opto - MFDeff - 1 cm	57
68	Opto - MFDeff - 1 cm	57
69	Gezhi - FWHMeff - 0 cm	65
70	Gezhi - FWHMeff - 0 cm	65
71	Gezhi - FWHMeff - 0 cm	65
72	Gezhi - FWHMeff - 0 cm	65
73	Gezhi - FWHMeff - 1 cm	65

74	Gezhi - FWHMeff - 1 cm	65
75	Gezhi - FWHMeff - 1 cm	66
76	Gezhi - FWHMeff - 1 cm	66
77	Opto - FWHMeff - 0 cm	66
78	Opto - FWHMeff - 0 cm	66
79	Opto - FWHMeff - 0 cm	66
80	Opto - FWHMeff - 0 cm	66
81	Opto - FWHMeff - 0 cm	67
82	Opto - FWHMeff - 0 cm	67
83	Opto - FWHMeff - 0 cm	67
84	Opto - FWHMeff - 0 cm	67
85	Opto - MFDeff - 0 cm	67
86	Opto - MFDeff - 0 cm	67
87	Opto - MFDeff - 0 cm	68
88	Opto - MFDeff - 0 cm	68
89	Opto - FWHMeff - 0 cm	68
90	Opto - FWHMeff - 0 cm	68
91	Opto - FWHMeff - 0 cm	68
92	Opto - FWHMeff - 0 cm	68
93	Opto - MFDeff - 0 cm	69
94	Opto - MFDeff - 0 cm	69
95	Opto - MFDeff - 0 cm	69
96	Opto - MFDeff - 0 cm	69
97	Opto - FWHMeff - 0 cm	70
98	Opto - FWHMeff - 0 cm	70
99	Opto - FWHM - 0 cm	70
100	Opto - FWHMeff - 0 cm	70
101	Opto - MFDeff - 0 cm	70
102	Opto - MFDeff - 0 cm	70
103	Opto - MFD - 0 cm	71
104	Opto - MFDeff - 0 cm	71

Seznam tabulek

1	Závislost vložného útlumu na počtu výstupních portů	26
2	Doba zatížení prvního coupleru od firmy Optokon	38
3	Doba zatížení coupleru firmy Optokon a čínského coupleru	39
4	Doba zatížení dvou couplerů od firmy Optokon	41
5	Optokon zatížený teplem a následně výkonem	42
6	Optokon zatížený výkonem a následně teplem	42
7	Měření FWHMeff při 1580,317 nm pro teplo + výkon	58
8	FWHMeff- Gezhi - 0 cm - 1309,25 nm	72
9	FWHMeff- Gezhi - 0 cm - 1580,317 nm	73
10	FWHMeff- Gezhi - 1 cm - 1309,25 nm	73
11	FWHMeff- Gezhi - 1 cm - 1580,317 nm	74
12	MFDeff- Gezhi - 0 cm - 1309,25 nm	74
13	MFDeff- Gezhi - 0 cm - 1580,317 nm	75
14	MFDeff- Gezhi - 1 cm - 1309,25 nm	75
15	MFDeff- Gezhi - 1 cm - 1580,317 nm	76
16	Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- FWHMeff - 1309,25 nm - 0 cm	76
17	Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- FWHMeff - 1580,317 nm - 0 cm	77
18	Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- FWHMeff - 1309,25 nm - 1 cm	78
19	Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- FWHMeff - 1580,317 nm - 1 cm	79
20	Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- MFDeff - 1309,25 nm - 0 cm .	80
21	Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- MFDeff - 1580,317 nm - 0 cm	80
22	Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- MFDeff - 1309,25 nm - 1 cm .	81
23	Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- MFDeff - 1580,317 nm - 1 cm	82
24	Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení- FWHMeff - 1309,25 nm - 0 cm	83
25	Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení- FWHMeff - 1580,317 nm - 0 cm	83
26	Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení- FWHMeff - 1309,25 nm - 1 cm	84
27	Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení- FWHMeff - 1580,317 nm - 1 cm	84
28	Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení- MFDeff - 1309,25 nm - 0 cm .	85
29	Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení- MFDeff - 1580,317 nm - 0 cm .	85
30	Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení- MFDeff - 1309,25 nm - 1 cm .	86
31	Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení- MFDeff - 1580,317 nm - 1 cm .	86
32	Měření s nestabilním laserem po tepelném zatížení- FWHMeff - 1310 nm	87
33	Měření s nestabilním laserem po tepelném zatížení- FWHMeff - 1550 nm	87
34	Měření s nestabilním laserem po tepelném zatížení- MFDeff - 1310 nm	88
35	Měření s nestabilním laserem po tepelném zatížení- MFDeff - 1550 nm	88
36	Měření s nestabilním laserem po výkonovém zatížení- FWHMeff - 1310 nm	89
37	Měření s nestabilním laserem po výkonovém zatížení- FWHMeff - 1550 nm	89

38	Měření s nestabilním laserem po výkonovém zatížení- MFDeff- 1310 nm	90
39	Měření s nestabilním laserem po výkonovém zatížení- MFDeff- 1550 nm	90

1 Úvod

Obecně optická vlákna nebo optické prvky jsou vyrobeny z celkem odolných materiálů a jsou navrženy tak, aby pracovali spolehlivě po dlouhou dobu. S rostoucími požadavky na větší přenosovou kapacitu např. ve WDM sítích mohou vznikat samozřejmě i negativa. S narůstajícím provozem je potřeba navyšovat optický výkon, ale ten nemusí být v některých případech žádoucí. Vysoká intenzita laseru může vnitřně poškodit optické vlákno či prvek a dochází k takzvanému umělému stárnutí. Tato problematika se v posledních letech začíná ve větší míře řešit, ale konkrétně stárnutím optických couplerů se dosud nevěnovala taková pozornost. Optické couplery se v některých případech označují jako slučovače, vláknové odbočnice, rozbočovače nebo děliče. Základní funkce Coupleru je rozdělení/sloučení optického výkonu z jednoho nebo více vstupů do několika výstupů. Využívá se např. ve WDM systémech nebo ve vláknových interferometrech.

Optická vlákna stárnou pokud jsou vystavena extrémním podmínkám při běžném provozu. Jsou umístěna mnohdy v prostředích s extrémními podmínkami jako je teplo, chlad, vlhko, radiace apod. Je potřeba se věnovat tomuto tématu, jelikož příčin k započetí stárnutí je mnoho. Tyto nežádoucí vlivy se mohou v reálných podmínkách také kombinovat, takže může docházet ještě k rychlejšímu stárnutí. Při plánování tras je potřeba myslet na tyto možné příčiny.

Optické komponenty budou stárnout kontinuálně. Výzkumem je proto potřeba zjistit, kdy tento proces nastane v závislosti na daném prostředí. Na základě této analýzy se do budoucna může určit, kdy se mění přenosové parametry optických prvků a může se tak předejít degradaci v telekomunikačních sítích.

Práce se zabývá analýzou změn parametrů SM optických vláknových couplerů po zatížení teplotou a vysokým optickým výkonem. Tyto uvedené zatěžování byly prováděny zvlášť a také kombinovaně. Couplery měly jedno vstupní a osm výstupních vláken. Konkrétně byly v couplerech měřeny efektivní hodnoty parametrů MFD (Mode Field Diameter) a FWHM (Full Width at Half Maximum). MFD a FWHM jsou parametry geometrie optického svazku a jsou běžně uváděny pro SM vlákna. Cílem práce nebylo zničit couplery, ale zjistit kdy se jejich vlastnosti mění.

2 Teoretický popis základních parametrů

V této kapitole se nachází teoretický popis několika základních parametrů pro lepší pochopení problematiky diplomové práce.

2.1 Šíření světla ve vlákne

Informace v optickém vlákne se přenáší pomocí světelného paprsku. Oproti elektrickému signálu nejsou nositelé signálu elektricky nabité elektrony, ale neutrální fotony. Nevznikají žádná elektrická a magnetická pole při přenosu, takže nevznikají žádné parazitní vazby.

Optická vlákna a vlnovody jsou založena na totálním odrazu světla na rozhraní dvou optických prostředí s rozdílnými indexy lomu. Index lomu je bezrozměrná veličina popisující šíření světla v materiálech. Pro index lomu n platí vztah:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

což je poměr rychlosti světla c ve vakuu k rychlosti světla v v určitém materiálu.

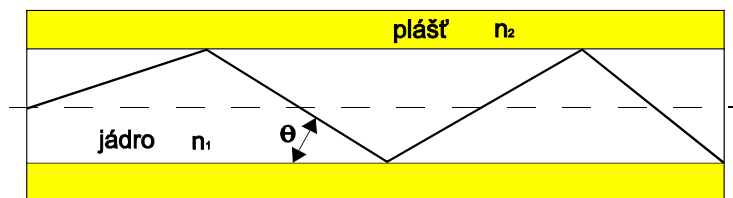
Pro splnění podmínky totálního odrazu musí být index lomu jádra n_1 větší než index lomu pláště n_2 . Platí tedy vztah:

$$n_1 > n_2. \quad (2)$$

Pokud přechází světlo z jádra (opticky hustšího prostředí) do pláště (opticky řidšího prostředí) pod úhlem větším než je mezní úhel dopadu θ_m , dojde k totálnímu odrazu na rozhraní těchto dvou prostředí. Mezní úhel dopadu se vypočítá následovně:

$$\theta_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

Je tedy nutné docílit, aby bylo světlo navázáno do vlákna minimálně pod tímto úhlem, respektive abychom předcházeli lomům světla do pláště a tím pádem k částečnému vyvázání výkonu. Na obrázku 1 je zobrazeno správné šíření paprsku pod správným úhlem dopadu a odrazu [1].



Obrázek 1: Šíření světelného paprsku v optickém vlákne

2.2 NA - Numerická apertura

Numerická apertura je bezrozměrná veličina a určuje schopnost navázat světlo z okolí do jádra optického vlákna. S rostoucí hodnotou NA se tato schopnost zlepšuje. Pro vlákna s homogenním jádrem (vlákna se skokovým indexem lomu - SI) platí:

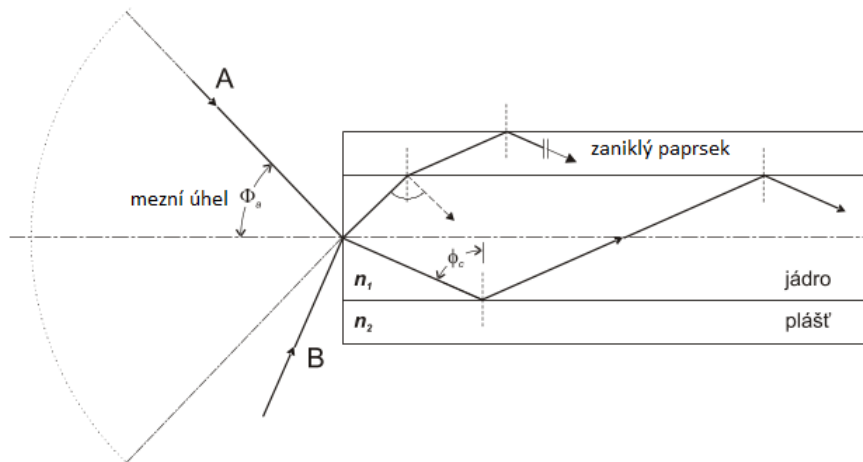
$$NA = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (4)$$

kde je n_1 je index lomu jádra a n_2 je index lomu pláště. NA se rovná sinu maximálního úhlu θ_a , což je úhel pod kterým se budou dopadající paprsky z okolí do jádra šířit celým vláknem. Pokud paprsky dopadnou pod větším úhlem než pod tímto mezním, tak nedojde k totálnímu odrazu paprsku na rozhraní jádro-plášť. Na rozhraní dojde k lomu paprsku, respektive se neodrazí a dojde k vybuzení ven z vlákna.

Mezní úhel a navázání paprsku do optického vlákna je na obrázku 2. Na obrázku je paprsek A, který dopadá na čelo vlákna pod již zmiňovaným mezním úhlem θ_a . Paprsky, které dopadnou pod tímto úhlem, se budou bezetrátově odrážet do jádra až na konec vlákna. Úhel dopadu paprsku B je větší než je θ_a , nebude tudíž splněna podmínka totálního odrazu. Paprsek B se bude přenášet ve vlákne, ale při každém odrazu bude ztrácet výkon, až úplně zanikne. K zjištění trajektorie paprsku se využije Snellův zákon lomu:

$$\frac{n_0}{n_1} = \frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_a}, \quad (5)$$

kde θ_a je úhel, pod kterým se šíří paprsek v jádře vlákna [2].



Obrázek 2: Navázání paprsku do optického vlákna [3]

2.3 Vidy v optickém vlákně

Přenos optického záření optickými vlákny probíhá pomocí vidů, které se nazývají také módy. Vidy jsou dány rozložením indexu lomu v průřezu vlákna. Mezi videm a paprskem je rozdíl. Paprsek představuje přímkou, zatímco vid představuje rozložení energie.

Paprsky, šířící se v optickém vlákně totálním odrazem, se dělí na meridionální a kosé. Meridionální paprsky prochází osou vlákna a dělí se podle rozložení elektromagnetického pole na módy transverzálně elektrické TE a transverzálně magnetické TM. Kosé paprsky nikdy neprotnou osu vlákna, jsou šroubovicového charakteru. Obvykle je tvoří módy HE, pokud převládá elektrická složka a EH, pokud převládá magnetická složka. K popisu těchto paprsků se používají ještě čísla l a m , takže zápis může vypadat např. takto EH_{lm} .

U vláken je ve většině případů malá relativní změna indexu lomu. Proto lze všechny zmíněné módy TE, TM, EH a HE aproximovat lineárně polarizovanými módy LP_{lm} . Tyto módy je možno vidět na obrázku 3.



Obrázek 3: Módy LP v optickém vlákně [4]

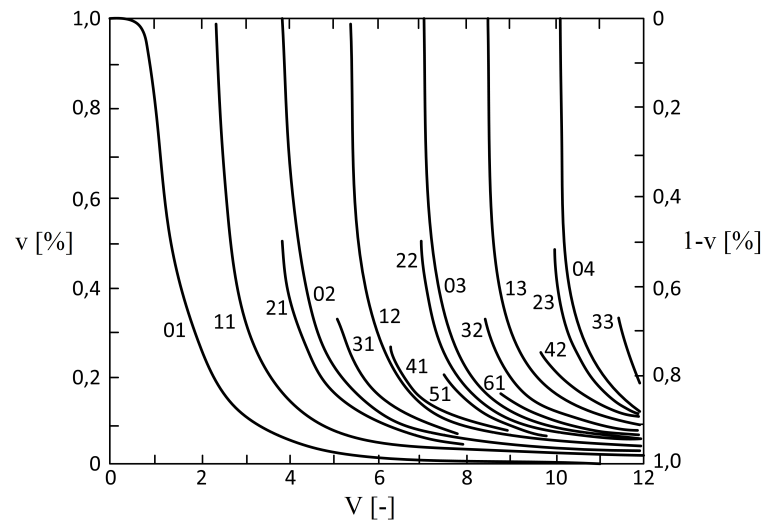
Pokud chceme ovlivnit typ nebo počet módů, využijeme tzv. normalizovanou frekvenci:

$$V = \frac{\pi d N A}{\lambda}, \quad (6)$$

kde d je průměr vlákna, NA je numerická apertura a λ je vlnová délka. Ze vzorce je vidět, že počet módů závisí na geometrických rozměrech vlákna, materiálových vlastnostech a vlnové délce. Aby bylo použito jednovidové vlákno, musí platit vztah:

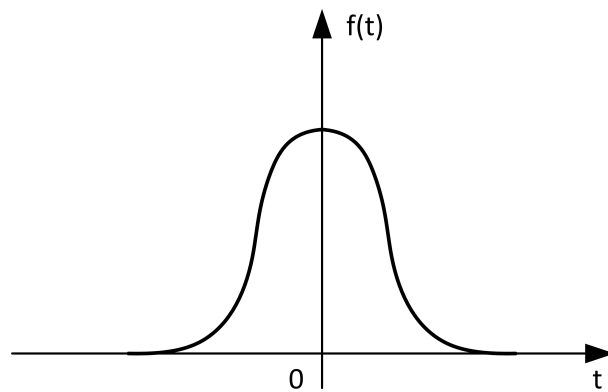
$$V \leq 2,405. \quad (7)$$

V jednovidových vláknech se bude šířit pouze mód LP_{01} , což je vidět na obrázku 4. Osa x zobrazuje normalizovanou frekvenci. Levá osa y zobrazuje část výkonu, která se šíří pláštěm a pravá osa y zobrazuje výkon v jádře [4].



Obrázek 4: Závislost normalizované frekvence na výkonu v jádře a plášti vlákna pro několik typů módů

2.4 Gaussovský svazek



Obrázek 5: Gaussov svazek $f(t)$

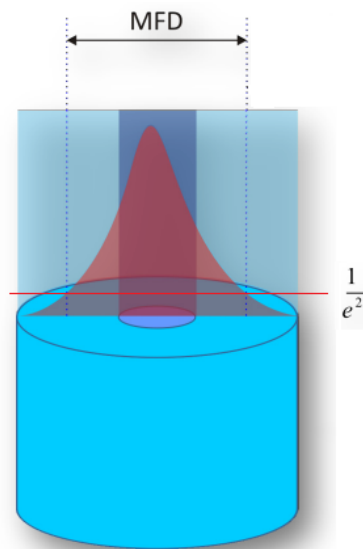
Vlivem přenosových vlastností optického vlákna se přenášené světlo popisuje pomocí Gaussovského průběhu. Tento průběh nejvíce odpovídá rozdělení výkonu v jádře a plášti ve vláknech se skokovou změnou indexu lomu. Gaussovský impuls lze matematicky vyjádřit vztahem [5]:

$$f(t) = \exp \frac{-t^2}{2\sigma^2} = \exp \frac{-2,77t^2}{\omega^2}, \sigma = 0,43\omega, \quad (8)$$

kde σ^2 je rozptyl, ω je šířka pulzu v polovině amplitudy.

2.5 MFD - Průměr módového pole

U jednovlákenných vláken se přenáší nezanedbatelné množství energie v plášti. Energie zasahující do pláště je zobrazena na obrázku 6 [4].



Obrázek 6: Energie šířící se v jádru a plášti

Kvůli tomuto rozložení energie ve vlákne se hůř popisuje rozhraní mezi jádrem a pláštěm. Proto se u SM vláken nestanovuje průměr jádra, ale průměr módového pole MFD. MFD udává rozložení paprsku ve vlákne (šířku paprsku), což je podstatnější údaj než rozměr jádra. Jelikož se paprsek nešíří jen v jádře vlákna, tak MFD je větší než průměr jádra. Energie se ve větší míře přenáší uvnitř a blízko jádra a klesá exponenciálně v plášti. Velikost MFD je závislá na průměru jádra, vlnové délce, indexu lomu jádra, indexu lomu pláště a NA. MFD roste s vlnovou délkou a také ohybové ztráty rostou s velikostí MFD, proto jsou vlákna citlivější na ohyb pro vlnovou délku 1550 nm než pro 1310 nm. Je to důležitý parametr např. při spojování či svařování SM vláken, kdy vlákna i když mají stejný rozměr jádra, mohou mít odlišné MFD a může tak narůst útlum.

MFD lze dobře vyjádřit pomocí již zmíněné Gaussovy křivky. Určuje se na této křivce mezi dvěma body při poklesu výkonu $1/e^2$ z maximální hodnoty, což odpovídá hodnotě 13,5 %. Zob-

razení MFD je vidět na obrázku 6 a taktéž na obrázku 7, který zobrazuje Gaussův průběh přímo z měření coupleru.

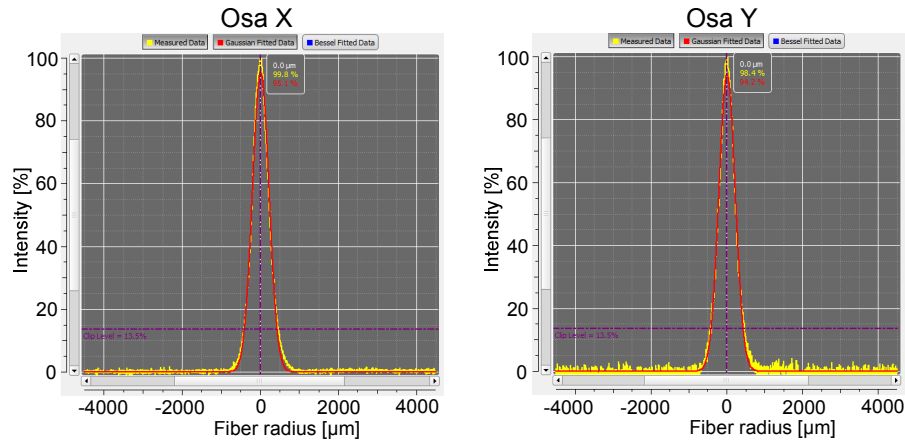
Průměr módového pole se vypočítá dle vztahu:

$$I_{MFD} = \frac{1}{e^2} I_{max} = e^{-2} I_{max} = 0,135 I_{max}. \quad (9)$$

Platí také vztah:

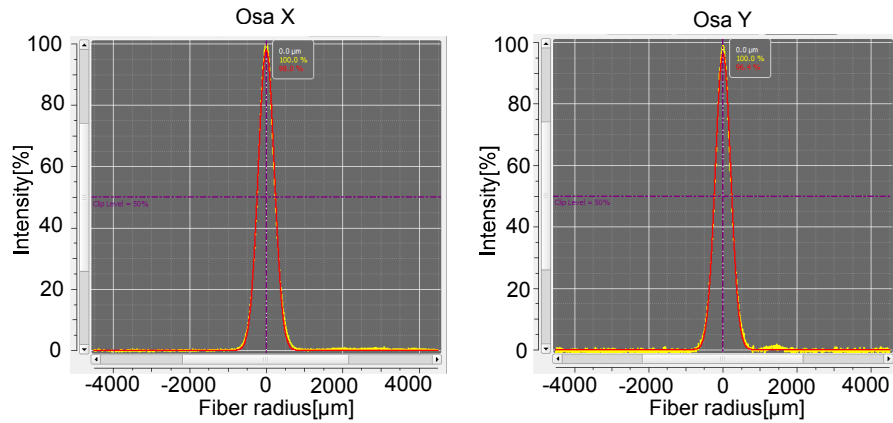
$$\omega_0 = \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0,65 + \frac{1,619}{V^{\frac{3}{2}}} + \frac{2,879}{V^6} \right), \quad (10)$$

kde je ω_0 průměr módového pole, a je poloměr jádra a V je normalizovaná frekvence [6][3][7].



Obrázek 7: Zobrazení MFD při měření coupleru na osách x a y pro mód LP₀₁

2.6 FWHM - Full Width at Half Maximum



Obrázek 8: Zobrazení FWHM při měření coupleru na osách x a y pro mód LP₀₁

FWHM, stejně jako MFD, představuje šířku optického paprsku. Tentokrát se šířka paprsku určuje při polovičním poklesu výkonu z jeho maximální hodnoty. Tento parametr dostaneme

zvolením hodnoty maximální přenosové intenzity paprsku, dále v polovině maximální hodnoty přenosové intenzity určíme body z každé strany paprsku a mezi těmito body naměříme vzdálenost, nebo-li šířku paprsku. Používá se např. k určování spektrální šířky zdroje využívaného v optických komunikacích. FWHM je zobrazeno na obrázku 8, opět z měření coupleru.

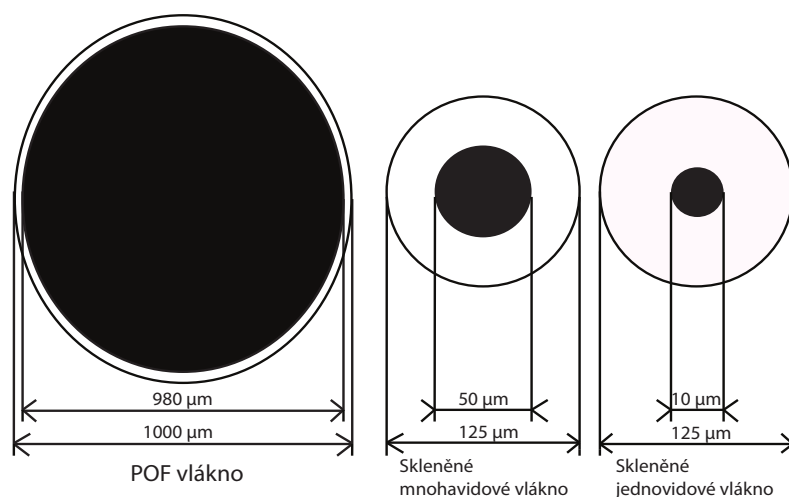
2.6.1 FDHM - Full Duration at Half Maximum

Využití parametru FDHM se doporučuje, pokud je závislá proměnná čas. Při zpracování signálů je šířka pásma definována šířkou v polovině maxima, kde je méně než polovina výkonu signálu utlumena o -3 dB.

2.7 Rozměry jádra optického vlákna

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, jádro je nejdůležitější část pro přenos signálu. Abychom dosáhli spolehlivého přenosu, je potřeba kvalitní výroba s přesností lepší než $1\text{ }\mu\text{m}$. Přesnou výrobou se zabrání vzniku mikroohybů, špatné kruhovitosti nebo větším ztrátám v optickém spoji. Ve spojích také mohou vzniknout malé odchylky jader způsobené např. použitím vláken od různých výrobců. Jádro bývá vyrobeno ze skla nebo v některých případech ze sloučenin plastu. Rozměry SM a MM vláken jsou $125\text{ }\mu\text{m}$, u plastových vláken $1000\text{ }\mu\text{m}$. Srovnání velikostí vláken je na obrázku 9, kde černou barvou jsou označeny jádra. Rozměry jader pro upřesnění [3][8]:

- **Singlemódová vlákna (SM):** $8 - 10\text{ }\mu\text{m}$.
- **Multimódová vlákna (MM):** $50\text{ }\mu\text{m}$ resp. $62,5\text{ }\mu\text{m}$.
- **Plastová vlákna (POF):** $980\text{ }\mu\text{m}$.



Obrázek 9: Srovnání velikostí plastových a skleněných vláken [9]

2.8 Kruhovitost optického svazku

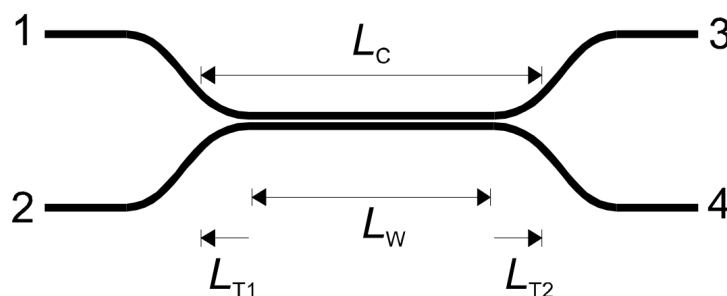
Tento parametr popisuje tvar optického svazku. V případě kruhové nedokonalosti optického svazku lze mluvit o elipticitě svazku. Hodnota kruhovitosti je maximálně 1, respektive 100 % pokud představuje optický svazek dokonalý kruh (udává se v procentech). Čím lepší bude kvalita kruhovitosti, tím bude kvalitnější a spolehlivější přenos dat. Na základě sledování kruhovitosti můžeme včas zjistit, že dochází k nežádoucím změnám při šíření energie vláknem či optickým prvkem[8].

3 Optické couplery

Optické couplery se mnohdy označují jako slučovače, vláknové odbočnice, rozbočovače nebo děliče. Couplery jsou pasivní optické prvky, stejně jako splitters nebo konektory. Často jsou se splitters označovány jako stejný prvek, ale je mezi nimi rozdíl v slučování a dělení signálu. Coupler umí signál dělit, ale i sloučit. Splitter má pouze jednu funkci a to dělení nebo sloučení. Používají se ve všech typech sítích. Zejména v pasivních optických přístupových sítích, kde jsou využity pouze pasivní prvky.

Couplery jsou nezávislé na konkrétní technologii použité pro optický přenos. Nevýhodou je, že zeslabují optický signál. S těmito nežádoucími účinky se musí počítat při návrhu sítí dostatečnou rezervou v optickém výkonu nebo využitím opakovače, ale tato varianta je ekonomicky nevýhodná. Využívá se jako multiplexor u WDM systémů, je také součástí vláknových zesilovačů, laserů nebo se vyskytují ve vláknových interferometrech.

Základní funkce Coupleru je rozdělení/sloučení optického výkonu z jednoho nebo více vstupů do několika výstupů. Pracují na principu vlnovodné vazby. K této vazbě dojde u dvou vláken, které jsou od sebe vzdáleny tak, že elektromagnetické záření z jednoho vlákna částečně zasahuje do druhého vlákna. Poté se tato energie začne přelévat do druhého vlákna díky vzájemné vazbě. K úplnému přelití dojde až při určité vzdálenosti, nebo-li vazební oblasti L_C (zobrazena na obrázku 10). Tato oblast se skládá ze dvou zúžených oblastí L_{T1} , L_{T2} a vazebního pásu L_W . Pokud je vzdálenost mnohonásobně větší než tato vazební oblast L_C , dojde k přelévání energie

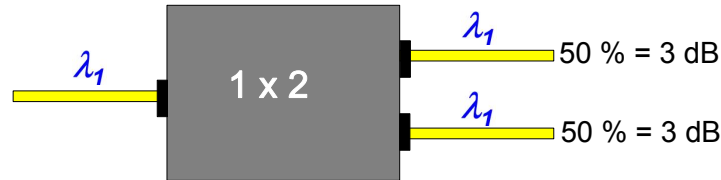


Obrázek 10: Zobrazení vazební oblasti u coupleru se čtyřmi porty[12]

mezi vlákny. Zvolením určité délky vazební oblasti se při výrobě určuje dělicí poměr výkonu. Ve vzdálenosti, která je rovna poloviční hodnotě vazební oblasti, bude dělicí poměr 50/50. Vazební délka je závislá na vlnové délce, vzdálenosti jader od sebe, indexech lomu a poloměru jader. Obvykle vazební délka není závislá na polarizaci [10][11][12].

Počet vstupních a výstupních portů u vazebních prvků je označován M:N. Nejčastěji se používá coupler s jedním vstupem a dvěma výstupy s dělicím poměrem 50/50. Na každý výstup lze navázat jiný poměr přenášeného výkonu. V případě poměru 50/50 bude jeden výstup přenášet 50 % výkonu a druhý také 50 %, jak je tomu na obrázku 11. U tohoto coupleru bude vložný útlum asi 3,5 až 4,5 dB, v závislosti na typu vlákna. Tři decibely značí poloviční výkon a zbytek

jsou vlastní ztráty coupleru. Tabulka vložných útlumů vzhledem k počtu výstupních vláken je zde 1[11].



Obrázek 11: Coupler s dvěma výstupními větvemi a stejným dělicím poměrem

Tabulka 1: Závislost vložného útlumu na počtu výstupních portů

Počet portů	Vložný útlum
[-]	[dB]
2	3,9
4	7,4
8	10,8
16	14,1
32	17,3
64	18,5
128	21,7

Lze vyrobit všechny kombinace dělicího poměru od 1/99 do 50/50, udávají se v procentech. Typické poměry kromě 50/50 jsou 70/30 a 90/10. Dále je možné vyrobit coupler se 4, 8, 16, 32 a 64 výstupy. Couplery s více výstupy mají obvykle stejné dělicí poměry výkonů. I když mají tyto prvky stejné dělicí poměry (50/50), tak nelze dosáhnout stejných výsledků na každé větvi kvůli nedokonalé výrobě. Rozdělení závisí na vlnové délce vstupujícího světla, vzdálenosti jader vlákna, délce vazební oblasti a na polarizaci světla. U SM couplerů se nejčastěji používají pro přenos vlnové délky 1310 a 1550 nm, pro MM 850 a 1300 nm. Couplery jsou dostupné i pro 650 nm.

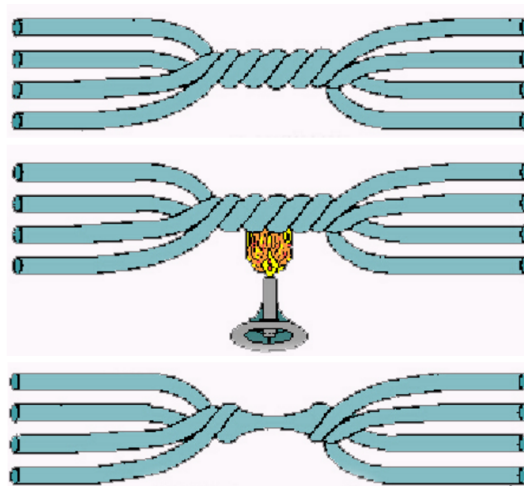
3.1 Typy couplerů

Při výrobě couplerů se jádra přiblíží k sobě a následně se nataví, svaří, vyryjí nebo vyleští. Místo, kde dojde k tomuto procesu se nazývá vazební oblast (zmiňována výše). V praxi to vypadá tak, že se vlákna zkroutí a poté jsou svařeny. Couplery se vyrábějí dvěma způsoby a to FBT (Fused Bionic Taper) a PLC (Planar Lightwave Circuit) technologií.

3.1.1 FBT couplery

FBT couplery se vyrábí starší a levnější technologií na bázi spojování (svařování) vláken. Tato technologie se provádí pro couplery s menšími počty výstupních vláken. Obvykle tyto couplery tvoří dvě až čtyři vlákna, maximálně však 8. Tyto couplery pracují jen na třech vlnových délkách a to 850, 1310 a 1550 nm. Vyrábí se v menším teplotním rozsahu (-5 až 75 °C), což není příznivé pro chladnější oblasti.

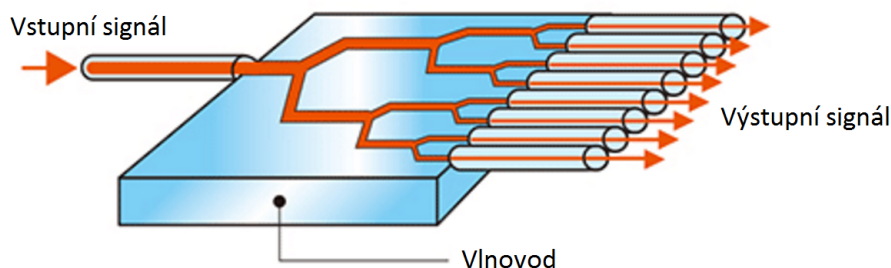
Např. při výrobě coupleru 2:2 jsou použita dvě vlákna. Uprostřed vláken se odstraní primární ochrana a poté se tato holá část očistí od prachu. Vlákna jsou v držáku překřížena kvůli kontaktu obou jader. Následně je jedno vlákno připojeno na zdroj s danou vlnovou délkou, na které bude coupler pracovat. Obě výstupní vlákna se připojí na fotodetektory, ty se připojí na počítač a nastaví se vstupní výkon. Spustí se hořák nebo laser, který působí na očištěné místo. Pohybuje se zleva doprava mezi držáky, které se současně pohybují opačnými směry a dojde k roztáhnutí. Při tavení dochází ke spojení jader a energie se začne přelévát z jednoho vlákna do druhého. Podle obou výstupních výkonů se hlídá dělicí poměr. Nakonec se podle požadavků odstraní zbytečná vstupní vlákna a vyřeší se mechanická ochrana. Příklad výrobního postupu je na obrázku 12[10][13][14][15].



Obrázek 12: Výrobní postup FBT coupleru

3.1.2 PLC couplery

Tato výrobní technologie je složitější než FBT. Vyrábějí se planární technologií, kde se na křemíkové desce vytvoří požadovaná struktura. Oproti FBT je dražší, ale má řadu výhod. Pracují ve velkém teplotním rozsahu (-40 až 85 °C), takže je lze použít v extrémních klimatických podmínkách. Díky PLC technologii lze vytvořit coupler až s poměrem 1:128. Se zvyšujícím počtem výstupních portů narůstá i vložný útlum. Coupler 1:32 má obvykle vložný útlum pod 17 dB. Na obrázku 13 je zobrazen vlnovod PLC coupleru[10][16][14][15].



Obrázek 13: Zobrazení vlnovodu PLC coupleru

3.2 Přenosové parametry coupleru

Každý coupler (pro různé vlnové délky) má šest základních přenosových parametrů:

3.2.1 Dělicí poměr

Je to poměr jednoho výstupu (P_2) k celkovému součtu všech výstupů, ($P_2 + P_3$) v případě 1:2. Pro coupler 1:2 je běžný poměr 50/50 nebo 90/10, ale jde vyrobit i jiný poměr. Couplery se stejným poměrem jsou označovány jako symetrické (více používané), v opačném případě asymetrické. U asymetrických couplerů bývá někdy označován port s vyšším poměrem jako výkonový (throughput) port a s nižším poměrem jako utlumený (tap) port. Jestli vazební člen provádí funkci děliče, tak je dělicí poměr označován jako splitting ratio (v opačném případě jako coupling ratio). Výpočet dělicího poměru, který je udáván v procentech [15][10]:

$$CR = \frac{P_2}{P_2 + P_3} 100. \quad (11)$$

3.2.2 Vložné ztráty (Insetion loss)

Je to poměr výstupního výkonu konkrétní větve ke vstupnímu výkonu. Jsou to ztráty v samotném coupleru, přesněji ztráty výkonu ze vstupu na daný výstup. Hlavním zdrojem vložných ztrát, nebo-li vložného útlumu je rozdělení vstupního signálu do několika výstupů a zda je coupler symetrický či asymetrický. Při 1:2 a poměru 50/50 bývá útlum okolo 3 dB, který s přibývajícím výstupy roste. Výpočet[15][17]:

$$IL = -10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right), \quad (12)$$

kde IL jsou vložné ztráty v dB, P_2 je výstupní výkon ve W na větvi č. 2 a P_1 je vstupní výkon ve W na větvi č. 1. Coupler s konkrétními výkony pro výpočet vložných ztrát je graficky zobrazen na obrázku 14.



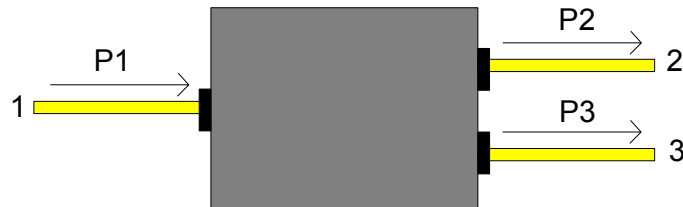
Obrázek 14: Grafické znázornění výpočtu vložných ztrát

3.2.3 Celkové ztráty (Excess loss)

Je to poměr celkového výstupního výkonu k celkovému vstupnímu výkonu. Pomocí tohoto parametru lze určit ztráty samotného coupleru, je to v podstatě ukazatel kvality vazebního členu. V ideálním případě by měly být celkové ztráty nulové, ale obvykle se pohybují kolem 1 dB. Jsou způsobené např. rozptylem světla. Výpočet[15][17][10]:

$$TL = -10 \log \left(\frac{\sum P_x}{P_1} \right), \quad (13)$$

kde TL jsou vložné ztráty v dB, $\sum P_x$ je součet výstupních výkonů ve W (v tomto případě P_2 a P_3). P_1 je vstupní výkon ve W na větví č. 1. Coupler s konkrétními výkony pro výpočet celkových ztrát je graficky zobrazen na obrázku 15.



Obrázek 15: Grafické znázornění výpočtu celkových ztrát

3.2.4 Homogenita ztrát (Uniformity)

V případě symetrického děliče 1:2 a poměru 50/50 bude útlum na obou větvích 3 dB, takže do obou výstupů jde v ideálním případě stejný výkon. V praxi je ale běžné, že se výstupní výkony budou lišit. Tyto odlišnosti řeší tento parametr. V ideálním případě jsou vložné útlumy na výstupech stejné a pokud ne, jedná se nehomogenitu. Homogenita ztrát se vypočítá jako rozdíl mezi maximálním vložným útlumem na jakémkoliv výstupu coupleru a minimálním vložným

útlumem opět na jakémkoliv výstupu. Výsledná hodnota by měla být velmi malá. Pro homogenitu ztrát platí[15][17]:

$$HL = IL_{MAX} - IL_{MIN}, \quad (14)$$

kde HL je homogenita ztrát v dB, IL_{MAX} jsou maximální vložné ztráty a IL_{MIN} jsou minimální možné ztráty. Alternativa tohoto výpočtu vypadá takto:

$$HL = -10 \log \frac{\min(P_{OUT})}{\max(P_{OUT})}, \quad (15)$$

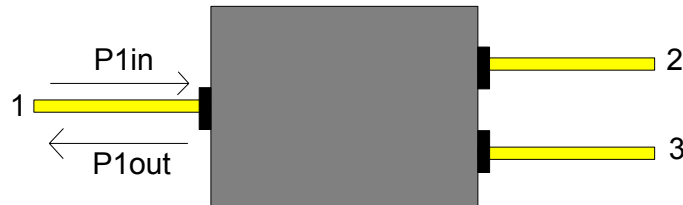
kde $\min(P_{OUT})$ je minimální výstupní výkon ve W a $\max(P_{OUT})$ je maximální výstupní výkon ve W.

3.2.5 Útlum zpětného odrazu (Return loss)

Útlum zpětného odrazu popisuje, jak velký vstupní výkon se odrazí od coupleru zpět ke zdroji. Tento útlum by měl být samozřejmě co největší pro zamezení zpětných odrazů. Coupler s konkrétními výkony pro výpočet útlumu zpětného odrazu je graficky zobrazen na obrázku 16. Pro výpočet platí[17]:

$$RL = -10 \log \left(\frac{P_{1out}}{P_{1in}} \right), \quad (16)$$

kde RL je útlum zpětného odrazu v dB, P_{1out} je výkon ve W odražený zpět ke zdroji a P_{1in} je výkon ve W vstupující do coupleru.



Obrázek 16: Grafické znázornění výpočtu útlumu zpětného odrazu

3.2.6 Směrovost (Directivity)

Je označována jako útlum přeslechu a určuje útlum mezi dvěma sousedními vstupy nebo výstupy, respektive popisuje jak moc jsou vstupy izolovány mezi sebou. Optický výkon P_{1in} , podle obrázku 17 směřující do vstupní větve 1, by se měl objevit jen na výstupu. Občas se ale zároveň objeví na další vstupní větvi P_{2in} , což by nemělo. Proto by měl útlum přeslechu být co největší, v rozmezí 40-60 dB. Měří se pro všechny kombinace vstupních a výstupních portů. Směrovost

je významná pro WDM multiplexory, kde by měl být odražený výkon do vysílače co nejmenší. Pro výpočet směrovosti platí[15][17]:

$$D = -10 \log \left(\frac{P_{2in}}{P_{1in}} \right), \quad (17)$$

kde D je směrovost v dB, P_{1in} je výkon ve W vstupující do coupleru a P_{2in} je výkon ve W ve vstupní větvi č. 2.



Obrázek 17: Grafické znázornění směrovosti

4 Stárnutí optických vláken a optických prvků

I když samotné optické vlákno pro optické komunikace bylo vyrobeno již v roce 1966, v telekomunikacích jsou optické sítě a optovláknové systémy relativně mladé téma. Obecně jsou optická vlákna nebo pasivní optické prvky vyrobeny z materiálů, které mají vysokou životnost a jsou navrženy tak, aby bez problémů pracovaly s vysokou spolehlivostí po dlouhou dobu. Kvůli těmto, zdánlivě ideálním, vlastnostem nebylo potřeba řešit nějaké stárnutí optických vláken. Optické vlákna byla do země ukládána na začátku 90. let, ale až v posledních letech se začíná více řešit do jaké doby budou vlákna či optické prvky schopné pracovat.

Vlákna bývají uložena v různých prostředích s extrémními podmínkami jako je teplo, vlhko, chlad či radiace. Takže příčin stárnutí je několik. Zmíněné nežádoucí vlivy mohou působit jednotlivě nebo v kombinaci s jinými. V takovém případě se stárnutí může ještě více urychlit. Při plánování trasy je proto vhodné analyzovat prostředí kvůli částečné eliminaci nežádoucích vlivů. Vlákna nebo optické prvky budou stárnout pořád, proto je potřeba zjistit kdy, v závislosti na prostředí.

Životnost se určí tak, že optická vlákna nebo pasivní optické prvky zatížíme extrémními podmínkami. Extrémní podmínky nám představují simulované prostředí, díky němuž můžeme pozorovat změny při stárnutí. Jinak řečeno, zatížením vyvoláme umělé (urychlené) stárnutí. Umělé stárnutí optických vláken a pasivních optických prvků lze dosáhnout několika způsoby, které budou popsány níže. Problematika stárnutí není publikovaná ve velké míře pro optické couplery, spíše jen pro samotná optická vlákna.

4.1 Umělé stárnutí vlivem tepla

Optické vazební prvky se využívají mimo jiné v místech s extrémními změnami teplot a vlhkostí jako jsou střechy nebo suterény. Jak již bylo řečeno v předchozích částech, teplota je významný parametr pro ovlivnění přenosových vlastností. Může vést ke zvýšení chybovosti nebo poruch optických vláken a pasivních optických prvků. Stárnutí se urychlí dlouhodobým působením vysoké teploty. Vlivy teplot na různé optické prvky jsou již publikovány v několika článcích. Tyto publikace zmíním níže pro lepší přehled a pochopení problematiky.

V prvním článku řeší dlouhodobou optickou spolehlivost a životnost optických vláken s dvojitým pláštěm, nebo-li DC (Double-Clad) vláken. Na DC byl aplikován polymer s dlouhodobou spolehlivostí ochrany. Na těchto vláknech byl zkoumán vliv tepla a vlhkosti. Mechanické standardy spolehlivosti pro 125 μm vlákna jsou zavedené podle normy Telcordia GR-20-CORE. Podle této normy bylo publikováno několik prací zabývajících se vlivem teploty a vlhkostí na DC vlákna se speciálními povlaky pláště. Výsledky těchto měření ukazují vliv teploty a vlhkosti na spolehlivosti nízko indexových (LI) fluoroakrylátových povlaků. Při těchto měřeních je však zároveň důležité rozdělovat účinky způsobené teplotou a vlhkostí, které mají vliv na spektrální útlum DC vláken. Výstupem tohoto experimentu je také model spolehlivosti. Spolehlivost je důležitý parametr schopen předvídat životnost při dlouhodobém působení teploty a vlhkosti [18][19].

Dále se zkoumala trvanlivost a slabiny Y-vlnovodu v multifunkčních integrovaných optických zařízeních zatížením vysokou a nízkou teplotou. Testy byly prováděny až do výskytu poruchy. Konkrétně se řešily parametry jako vložný útlum, dělicí poměr, extinkční poměr a půlvlnné napětí. Při zatěžování byly objeveny dvě zásadní slabiny a to slabší odolnost materiálu a struktura ve vazební oblasti. Z provedených testů je vidět, že se změnil vložný útlum $\alpha \leq 0,45$ dB, dělicí poměr $\alpha \leq 3\%$, polarizační útlum přeslechu $\alpha \leq -30$ dB a půlvlnné napětí $\alpha \leq 1,8\%$. Pro vyhodnocení životnosti zařízení byl využit Arrheniův model. Výsledky experimentu ukázaly, že Y-vlnovod vydrží 18 000 hodin při teplotě 85 °C. Toto odpovídá životnosti $1,6 \cdot 10^7$ hodin při teplotě 22 °C [20].

Třetí článek se zabýval optickými komponenty jako jsou konektory či couplery, které jsou důležitou součástí při budování optických sítí. Na optických couplerech se měřily změny útlumů v závislosti na teplotě. Konkrétně se testovaly optické couplery 1:2 s dělicím poměrem 50:50 a couplery 1:4 s dělicím poměrem 25:25:25:25. Pozorovanými parametry byly vložný útlum každé větve, dělicí poměr, zbytkový útlum a útlum přeslechu mezi větvemi. Oba couplery byly měřeny při teplotě 20 °C do 100 °C s krokem 5 °C. Při vyšších teplotách se u obou couplerů navýšil vložný útlum, ale ostatní parametry se pohybovaly kolem hodnot uvedených výrobcem při pokojové teplotě [21].

V následujícím experimentu zkoumaly účinky tepelného stárnutí na multimódových křemičitých vláknech. Tyto vlákna byly po 8hodinových cyklech zahřívány a ochlazovány. Výsledky byla analyzovány pomocí spektrálního analyzátoru a metody OTDR. Bylo prokázáno, že existuje souvislost koeficientu útlumu s Rayleighovým rozptylem. Koeficient útlumu se navyšoval v závislosti na délce zatěžování. Z výsledků je vidět, že degradace optických vlastností nastává při zátěži od 1680 hodin a výše. Dochází ke změnám indexu lomu v místě, kde dojde ke kolísání hustoty materiálu [22].

Zde je uveden experiment s optickými komunikačními zařízeními, které byly vystaveny tepelnému a vlhkému prostředí. Článek uvádí, že existuje korelace mezi optickým výkonem a fyzikálními vlastnostmi vytvrzeného epoxidu. Zatížení probíhalo při 85 °C a 85 % vlhkosti. Vlivem těchto událostí dochází ke zhoršení vlastností vytvrzeného epoxidu jako je teplota skelného přechodu, koeficient tepelné roztažnosti a přilnavosti. Optický výkon nebo vložný útlum lze zlepšit, pokud vystavíme degradované zařízení určité teplotě. Tento reverzní jev je přičítán absorpci vlhkosti ve zkušebních podmínkách a desorpci při vysoké teplotě [23].

Odolnost vůči vnějším vlivům u couplerů samozřejmě závisí i na samotném obalu. Je potřeba zabránit mechanickému namáhání, znečištění či tepelné roztažnosti materiálů. Pro FBT coupler byla vyrobena konstrukce obalu vstřikováním plastů. Byly použity tekuté krystaly polyesterové pryskyřice. Tyto obaly by měly být levnější oproti alternativě ze skla nebo kovu. V experimentu bylo využito více než 100 couplerů testovaných v několika cyklech. Od -50 °C do +85 °C. Při plus 85 °C byly couplery zatěžovány 1000 hodin. Dále ve vlhkosti 95 % při 65 °C. Na couplery byly taky vyvinuty vibrace. Tyto obalové techniky by měly z výsledků testování odolat drsným podmínkám [24].

Nejnovější článek řeší vliv tepelného stárnutí na základní parametry optického vazebního členu. Testovaný vazební člen měl jeden vstup a osm výstupů (1:8). Zatížení proběhlo při teplotě 95 °C po pěti cyklech (celkem 959 hodin). Po jednotlivých cyklech byl coupler zchlazen na pokojovou teplotu (asi 25 °C) a poté byl měřen optický výkon na vstupu a výstupu vazebního členu. Pomocí vzorců se pak vypočítaly vložné útlumy na jednotlivých větvích, dělicí poměry, celkový útlum, homogenita ztrát a přeslechy mezi větvemi. Měření proběhlo na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Výsledky v dokumenty jsou uvedeny pro měření před a po pěti cyklech ohřevu. Měřené parametry, pro jednotlivé větve, se po pěti cyklech nezvyšovaly nebo nesnižovaly stejně. I po 959 hodinách je potřeba coupler dále zatěžovat kvůli přesnějším výsledkům [25].

4.2 Umělé stárnutí vlivem vysokého optického výkonu

Se vzrůstajícími požadavky na větší přenosovou kapacitu v přenosových sítích mohou vznikat samozřejmě i negativa. Jelikož patří do telekomunikačních sítí i sítě optické, je potřeba brát v potaz velikost optického výkonu. Zvyšováním optického výkonu vzroste sice přenosová kapacita, ale můžou se zhoršit některé vlastnosti v optické síti. Příliš vysoký výkon může poškodit samotné vlákno či optický prvek a nebo dochází k umělému stárnutí. Měření umělého stárnutí vlivem vysokého optického výkonu probíhá podobně jako u dalších metod umělého stárnutí. Optické vlákno nebo prvek je vystaveno extrémním podmínkám, v tomto případě vysokému optickému výkonu po určitý čas a následně se zjišťuje vliv zvýšeného výkonu na vlastnosti zatěžovaného prvku.

V optickém vlákne nebo kterémkoliv optickém prvku dochází ke třem základním mechanismům poškození uvnitř jejich materiálů. Prvním takovým mechanismem je počáteční terminální výbuchový model, který je založen na rovnici přenosu tepla. Tato rovnice bere v úvahu optický materiál, intenzitu laserového svazku, teplotu a koncentraci nečistot v hostitelském materiálu. Výsledky rovnice potvrzují, že teplota koncentrace příměsí je vysoká při prahovém poškození. Teplota nabývá hodnoty až 70 000 K. Toto vede k buzení volných nosičů UV zářením, dutinky se rozšiřují a dojde k poškození hostitelského materiálu. Tento mechanismus je označován jako vnější.

Další dva mechanismy jsou označovány jako vnitřní. Nazývají se ionizace nárazem a fotoionizace. Tyto mechanismy jsou si celkem podobné. Vznikají při vysoké intenzitě laserového záření a ovlivňují hustotu elektronů ve vodivostním pásu. Ionizace nárazem a fotoionizace se liší hlavně v šířce pulzu laserového záření. Ionizace nárazem převládá u pulzů větších než 50 fs, fotoionizace zase převládá u pulzů kratších než 50 fs. Níže je uvedeno několik článků na tuto tematiku [26].

První článek se zaměřuje na poškození vláken s určitým poloměrem ohybu. U vlákna s menším poloměrem ohybu dojde při působení vysokého výkonu k většímu poškození než u vlákna s větším poloměrem ohybu [27].

Teplota povrchu ohnutého vlákna způsobena vysokým výkonem je zkoumána v další publikaci. Počáteční hodnota teplotní rovnováhy vlákna v ohybu byla použita jako referenční. Snížení teploty, pod tuto hodnotu, při ohybu kladně přispívá ke snížení rizika poškození, ale

vede to k zrychlení stárnutí povlaku vlákna. Pomocí výsledků z tohoto experimentu lze přesněji vypočítat rozložení teploty ohnutého vlákna [28].

Další experimentální měření zkoumalo poškození tavených optických vláken vyvolaných Nd:YAG optickým laserem. Měření probíhalo ve vakuové komoře, kde byl tlak vzduchu na vstupu optického vlákna redukován na 10-100 Pa. Na konci optického vlákna byl vyvolán průraz laserem potlačený. Prahová hodnota průrazu se zvýšila 1,85krát než v atmosféře. Poškození bylo způsobeno pulzy stojaté vlny laseru a ablací. Výsledky ukázaly sníženou odolnost vlákna vůči laserem vyvolanému poškození, což bylo potvrzeno velkým množstvím poruch na čelní ploše vlákna. Vlivem sníženého tlaku nastalo poškození vstupního segmentu vlákna, které se nacházelo ve vzdálenosti 5-30 mm od vstupního čela vlákna. Vypálená část vlákna byla 1 až 3 mm dlouhá podél osy jádra optického vlákna. Je to způsobeno počátečním odrazem optického paprsku generovaného laserem na rozhraní jádra a pláště optického vlákna [29].

V tomto příspěvku se řeší monolitické, tavené vláknové zařízení. Tyto zařízení jsou jasnou volbou po plně integrované a spolehlivé vláknové lasery. Tyto zařízení se zařazují do dvou odlišných skupin: jednomódová a multimódová zařízení. Funkčnost jednomódových zařízení závisí na plášťovém navázání vycházejícího z bikonického zúžení. Patří mezi ně splitters, couplery a filtry. Multimódová zařízení jsou určeny hlavně pro kombinování výkonů z diodových pump [30].

4.3 Umělé stárnutí vlivem gama záření

Gama záření je vysoce elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních či jiných jaderných dějích. Při vzniku gama záření často vzniká také alfa a beta záření. Toto záření je definováno jako záření s energií fotonů větší než 10 keV. S tímto jevem se mohou optická vlákna a pasivní optické prvky dostat do styku velice snadno jako např. v okolí jaderných elektráren, jaderně-energetických zařízení, v kosmu ve formě kosmického záření, v medicíně a také v přírodě v podobě přírodních radionuklidů. Jednotka gama záření je Gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$), která odpovídá energii absorbované jedním kilogramem látky. Záření 1 Gy již způsobuje zdraví škodlivé účinky na živé organismy. Může mít i léčivé účinky na organismus, záleží na zvolené velikosti intenzity gama záření.

Optické pasivní prvky bývají zatěžovány např. Cobaltem-60. ^{60}Co je radioaktivní izotop kobaltu s poločasem rozpadu 5,2714 roku. Je relativně snadný na přípravu a taktéž manipulace není složitá. Využívá se v medicíně pro ozařování nádorových onemocnění nebo zabraňuje vzniku plísní.

Velký vliv na strukturu ferule má toto ^{60}Co gama záření. Článek [7] popisuje ozařování couplerů gama zářením. Couplery absorbovali dávku 34,32 kGy, která odpovídá šedesáti letům provozu v plášti jaderné elektrárny. Po zatěžování byly měřeny parametry MFD a FWHM pomocí zařízení BP109-IR. Měření proběhlo pro 1:2 SM couplery s různými dělicími poměry výkonů. Pro poměr 50/50 Hodnoty MFD a FWHM klesaly nelineárně s rostoucí dávkou ozáření. Pro 1553 nm dosahovaly tyto parametry vyšších hodnot než pro 1303 nm. Gama záření zároveň

změnilo krystalickou mřížku ferulí takovým způsobem, až zčernaly. Na obr. 18 je vidět srovnání ferule optického vlákna před a po zatížení gama zářením. Dále probíhalo měření s couplery s dělícím poměrem 30/70 a 10/90.



Obrázek 18: Srovnání ferulí před (bílá) a po vlivu gama záření (černá) [7].

4.4 Umělé stárnutí vlivem mechanického namáhání

Optická vlákna jsou náchylná na mechanické poruchy. Životnost optických vláken a optických prvků se zkracuje při nevhodném zacházení. Je potřeba dbát na správnou instalaci či zamezení vnějších vlivů jako tah, tlak, ohyb apod. Může dojít k navýšení útlumu nebo chybovosti. Na toto téma se provádí opět několik experimentů, kde jsou měřeny optické prvky metodami mechanického urychleného stárnutí [31].

4.5 Umělé stárnutí vlivem vodíku

Vodík, nebo-li Hydrogen působí vzájemně s optickými prvky. Díky malým molekulám dokáže vodík procházet různými materiály. Je celkem obtížné ho uskladnit kvůli těmto vlastnostem. Navíc při určité koncentraci se vzduchem může dojít k výbuchu [32].

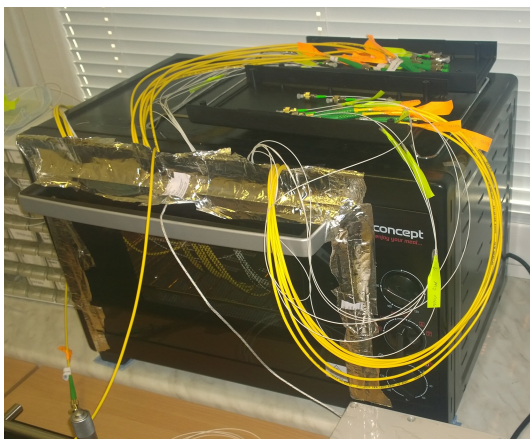
První objevené nežádoucí vlivy hliníku byly způsobeny přítomností fosforu a germania v MM vláknech a přítomností teploty u SM vláken. Docházelo k navýšení útlumu. Vodík může pocházet z několika zdrojů jako např. okolní atmosféry, rozpuštěním kabelových materiálů (kovy, uhlovodíkové polymery), galvanickou reakcí různých kovů v kabelu nebo koroze. Stárnutí působením vodíku způsobuje absorpci světla na určitých vlnových délkách. Dnes se už optická vlákna navrhuji s větší odolností vůči vodíku [33].

5 Měření

V této části je popsán způsob zatěžování optických couplerů a metoda měření efektivních hodnot MFD, FWHM.

5.1 Urychlené stárnutí vlivem vysoké teploty

Couplery byly zatěžovány vysokou teplotou na půdě katedry univerzity VŠB-TUO. Zatěžování probíhalo v elektrické troubě Concept ET 5050 (obr. 19). Do trouby byly umístěny dva couplery



Obrázek 19: Elektrická trouba Concept ET 5050

1:8, respektive s jednou vstupní větví a osmi výstupními větvemi s rovnoměrným dělicím poměrem optického výkonu. Kvůli porovnání vlivů tepla na různé couplery byly použity tyto typy:

- Coupler SFT-S35-01x08-12 CM4-NPC-NPC firmy Optokon
- Coupler WBC-1x8-13/15 čínské firmy Gezhi



Obrázek 20: Coupler Gezhi vlevo a Optokon vpravo

Coupler Optokon je dle datasheetu odolný při pracovních podmínkách od -40°C do 85°C a Gezhi od -20°C do 70°C . Aby započalo umělé stárnutí, musela být zvolena hodnota vyšší

než je v uváděných datasheetech. Zatěžování probíhalo při konstantní teplotě $95\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, která byla měřena pomocí multimetru. Tato teplota byla zvolena taktéž na základě předchozích zahřívacích testů prováděných zaměstnanci VŠB-TUO, kdy se testovala odolnost FC/APC konektorů, které jsou rovněž použity u měřených optických couplerů. U těchto konektorů došlo k trvalému mechanickému poškození až při překročení teploty $98\text{ }^{\circ}\text{C}$. Došlo k tavení plastové ochrany a ochrana výstupů se vlivem vysoké teploty při chladnutí začala kroutit, takže docházelo k ohybům s velmi malými poloměry. Uváděná teplota $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ je tedy vhodná k započetí procesu stárnutí [34][35].

5.1.1 První způsob zatěžování teplem

Zatěžování probíhalo dvěma způsoby. Nejprve byl pro měření využit pouze coupler od firmy Optokon, který byl zatěžován v rozmezí 126-426 hodin (tabulka 2).

Tabulka 2: Doba zatížení prvního coupleru od firmy Optokon

Optokon	
Počet zatížení	Čas
[-]	[hod.]
1	142
2	126
3	165
4	426
Celkem	859

Coupler byl v troubě položen na kovovou podložku a pravidelně otáčen kvůli rovnoměrnému zatížení teplem z obou stran. Doba zatížení se měnila na základě získaných výsledků. Po každém zatížení byl coupler vyjmut z trouby a po jeho vychladnutí, přibližně na $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, probíhalo měření. Následně byl coupler opět vložen do trouby a proces se opakoval celkem čtyřikrát. Po čtvrtém zatížení, na některých konektorech na výstupních větvích, docházelo k trvalému mechanickému poškození. Plastová ochrana se tavila, docházelo k již zmíněným ohybům. Poškozený konektor je zobrazen na obrázku 21. . Došlo tedy ke zkreslení výsledků a další zatěžování stejného coupleru



Obrázek 21: Poškozený konektor po čtvrtém tepelném zatížení

se tím pádem zamítlo. Při měření s tímto couplerem byl navíc využíván laserový zdroj EXFO AXS-200 SharpTESTER, který nebyl optimálně stabilní.

5.1.2 Druhý způsob zatěžování teplem

Bylo tedy potřeba začít nové zatěžování, ale jiným způsobem. Tentokrát jsem využil čínský coupler Gezhi a nový coupler Optokon. Oba couplery byly v troubě kontinuálně zatěžovány. Jejich konektory vyčnívaly ven (obr. 19), takže měření probíhalo paralelně se zatížením bez potřeby jeho přerušování. Nedošlo tak k opětovnému poškození konektorů. Jelikož byly couplery kontinuálně zatěžovány, je v tabulce 3 uvedeno počet měření a jednotlivé časy zatížení v danou dobu měření. Pro měření byly využity dva nové stabilní lasery, ale ve dvou případech nebylo možno s nimi měřit zároveň v jeden den. Proto jsem uvedl jednotlivé časy zatížení pro oba laserové zdroje.

Tabulka 3: Doba zatížení coupleru firmy Optokon a čínského coupleru

Optokon			Gezhi		
Č. měření	Čas [hod.]		Č. měření	Čas [hod.]	
[-]	1309,25 [nm]	1580,317 [nm]	[-]	1309,25 [nm]	1580,317 [nm]
1	0	0	1	0	0
2	195	195	2	171	171
3	336	336	3	336	336
4	336	336	4	336	336
5	744	648	5	768	672
6	960	1056	6	960	1056
7	696	696	7	696	696
8	504	504	8	504	504
Celkem	3771	3771	Celkem	3771	3771

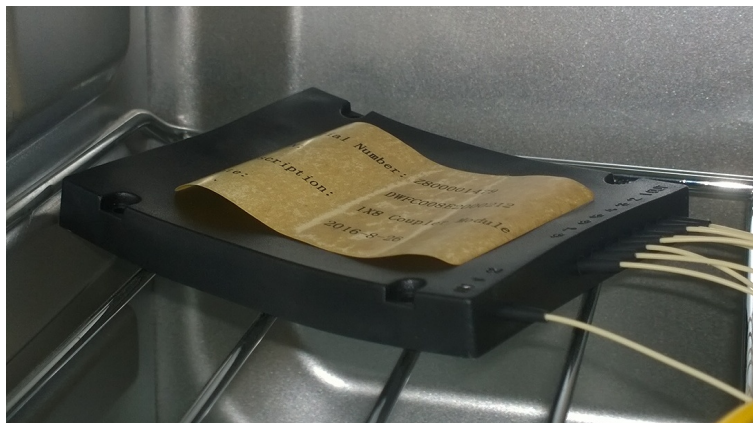
Zatížení opět probíhalo při 95 °C. Po 3771 hodinách bylo zatěžování zastaveno a coupler značky Optokon byl dále namáhán vysokým výkonem. Čínský coupler byl po 3771 hodinách zničen. Tento coupler má ochranné pouzdro z plastu a dlouhodobým namáháním teplem se až prohnul, jak je vidět na obrázku 22. Na čínském coupleru byl naměřen při osmém měření výkon kolem 20-100 μW pro 1309,25 nm a 0,010 μW pro 1580,317 nm. Původní hodnoty se pohybovaly kolem 700 μW pro 1309,25 nm a 230 μW pro 1580,317 nm. Při 1580,317 nm zařízení BP109-IR pro měření MFD a FWHM nebylo schopno již nic detekovat.

5.1.3 Arrheniova rovnice

Pro přepočítání doby zatížení na reálné roky se využívá Arrheniova rovnice[36]:

$$t_f = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta H}{kT}\right), \quad (18)$$

kde T je teplota v Kelvínech, kdy dojde k selhání. Dále k je Boltzmanova konstanta, konstanta A udává závislost na materiálu, ΔH je aktivační energie. Hodnota aktivační energie závisí na mechanismu zatěžování a použitém materiálu. Obecně se typická hodnota pohybuje od 0,3 nebo 0,4 až do 1,5. Tato rovnice je častý model pro předpověď funkčnosti daného zařízení, které je závislé na teplotě. Na základě tohoto modelu můžeme např. předejít problémům týkající se provozní doby couplerů v telekomunikační síti. Na základě těchto parametrů je ale složité určit výsledek pro uvedené couplery, proto je rovnice uvedena pouze teoreticky. Ale např. několik tisíc hodin zatížení při teplotě 95 °C se odhaduje na desítky až stovky let.



Obrázek 22: Čínský coupler Gezhi prohnutý po 3771 hodinách namáhání teplem

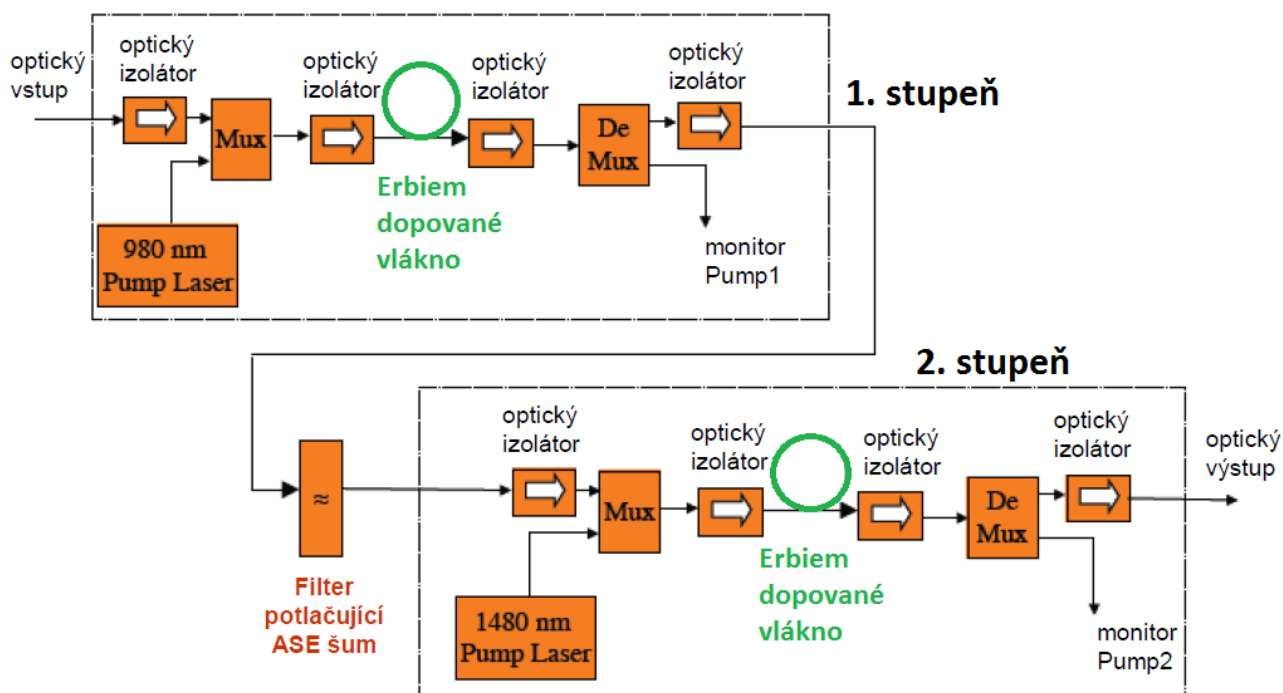
5.2 Urychlené stárnutí vysokým výkonem

Zatěžování vysokým výkonem probíhalo taktéž na půdě katedry univerzity VŠB-TUO. Coupler od firmy Optokon byl zatěžován pomocí vláknového laseru s kaskádovým zapojením EDFA zesilovačů (obr. 23).

První stupeň tvoří vláknový zesilovač s erbiem dopovaným vláknem (FiberCore IsoGain I-6) s délkou 6 m. V erbiem dopovaném vlákně je generováno světlo o vlnové délce 1550 nm. Pomocí laserové diody je do tohoto vlákna dodána energie o vlnové délce 978 nm. Dodaný světelný výkon laserovou diodou byl 600 mW. Přes WDM coupler 1550/980 nm bylo poté dodáno čerpací světlo s vlnovou délkou 980 nm. Za vláknem je umístěn výstupní dělič s poměrem 90:10. Na první výstup, který je zároveň výstup prvního stupně, jde 10 % výkonu. Výstupní výkon prvního stupně byl 75,85 mW. Na druhý výstup, který je připojen na optický izolátor, jde 90 % výkonu. Optický izolátor je připojen na vstup WDM coupleru 1550/980 nm a je tím pádem vytvořena smyčka. Jde tedy o laser s kruhovým rezonátorem.

Druhý stupeň tvoří standardní EDFA zesilovač. Dodaný světelný výkon laserovou diodou byl 500 mW při vlnové délce 980 nm. Přes WDM coupler 1550/980 nm s integrovaným izolátorem bylo přivedeno čerpací světlo do erbiem dopovaného vlákna. Bylo použito vlákno Liekki ER110-4/125 o celkové délce 40 cm. Takto krátká délka vlákna je opodstatněná vysokou absorpcí vlákna,

která je přibližně 110 dB/m. Výsledný výstupní výkon z druhého stupně EDFA zesilovače byl 250 mW [37][38].



Obrázek 23: EDFA zesilovač - První a druhý stupeň[39]

Výkonem byly zatíženy dva 1:8 couplery od firmy Optokon, které se připojovali na výstup EDFA zesilovače. První coupler, nazvaný Optokon 1, byl zatěžován jako první. Ale jelikož byl měřen opět nestabilním laserovým zdrojem jako Optokon u tepelného zatížení, bylo zatěžování zastaveno po dvou cyklech a celkově po 252 hodinách. Kvůli měření s novými laserovými zdroji byl dále zatěžován a měřen druhý coupler, nazvaný Optokon 2. Tento coupler byl po dvou cyklech, celkově po 573 hodinách zatížení výkonem, vložen do trouby a namáhán teplem. Jednotlivé cykly zatížení vysokým optickým výkonem jsou zobrazeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Doba zatížení dvou couplerů od firmy Optokon

Optokon 1		Optokon 2	
Počet zatížení	Čas	Počet zatížení	Čas
[-]	[hod.]	[-]	[hod.]
1	139	1	248
2	113	2	325
Celkem	252	Celkem	573

5.3 Urychlené stárnutí vlivem vysoké teploty a výkonu

Zatížení uvedené v předchozích tabulkách bylo ukončeno. V dalším kroku Optokon z tabulky 3 byl po 3771 hodinách zatížení teplem následně namáhán výkonem. Celkový počet hodin namáhání je uveden v tabulce 5.

Tabulka 5: Optokon zatížený teplem a následně výkonem

Optokon	
Zatížení	Čas
[-]	[hod.]
Teplo	3771
Výkon	570
Celkem	4341

Dále Optokon 2 z tabulky 4 zatěžovaný výkonem byl poté namáhán teplem. Hodnoty namáhání jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Optokon zatížený výkonem a následně teplem

Optokon	
Zatížení	Čas
[-]	[hod.]
Výkon	573
Teplo	531
Celkem	1104

5.4 Princip měření MFD a FWHM

Při měření jsem sledoval šíření energie módu LP_{01} SM optických vláknových couplerů po výkonovém a tepelném namáhání. Výsledky jsem porovnával na základě parametrů MFD a FWHM. Tyto parametry jsem měřil pomocí zařízení BP109-IR a softwaru Thorlabs Beam.

5.4.1 Měření pomocí BP109-IR

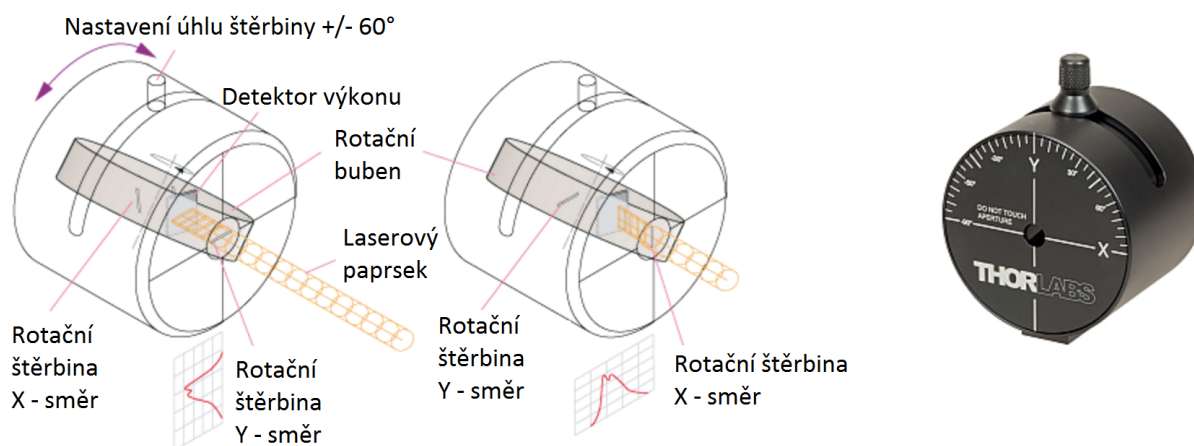
Pro sledování šíření energie v couplerech jsem použil zařízení BP109-IR, respektive Scanning Slit Optical Beam Profiler od firmy Thorlabs. Tento způsob měření byl zvolen kvůli analýze vhodného tvaru paprsku. Přístroj BP109-IR je schopen analyzovat tvar paprsku, který je blízký Gaussovému normálnímu rozdělení. Díky této analýze lze změřit parametry MFD a FWHM. Výhodné je, že toto zařízení lze připojit přes USB rozhraní k počítači a je k němu volně dostupný software. Na obrázku 24 je zobrazena hlavní část BP109-IR, která tvoří posuvnou část a mobilní hlavu.

Součástí mobilní hlavy je rotační buben. BP109-IR využívá tzv. technologii skenovací šterbiny. Tyto šterbiny jsou orientovány pod úhlem $+45^\circ$ a -45° vzhledem k ose otáčení. Osa



Obrázek 24: Hlavní část zařízení Thorlabs BP109-IR

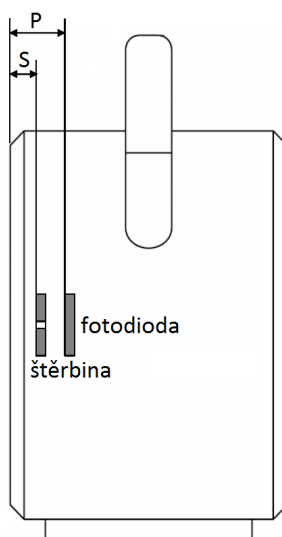
skenování je pod úhlem 45° , takže skenování laserového paprsku probíhá pod úhlem 0° a 90° . Tyto dva úhly jsou označeny jako X a Y na přední straně hlavy (obr. 25). Nastavování úhlu štěrby je důležité pro měření elipticity. V této práci měření elipticity neprobíhalo, proto byl nastaven úhel na 0 stupňů. Rotační buben obsahuje fotocitlivý materiál potřebný k detekci záření v infračervené oblasti. Jako detekční materiál se využívá sloučenina InGaAs (Indium, Galium, Arzenid). Tento materiál se vyskytuje v mnoha detektorech a lze díky němu kvalitně zachytit měřený paprsek či prostorové rozložení energie. BP109-IR dokáže zaznamenat pásmo optického záření od 700 nm do 1800 nm s průměrem paprsků $2,5\text{ }\mu\text{m}$ do 9 mm. V tomto zařízení je integrován powermeter, ale není kalibrován. Popis mobilní hlavy je na obrázku 25.



Obrázek 25: Mobilní hlava zařízení BP109-IR

Na obrázku 26 je mobilní hlava z profilu. Tady je vidět, že umístění štěrbiny a fotodiody není přímo za sebou. Štěrba je umístěna ve vzdálenosti 1,87 mm od začátku hlavy (označení S), fotodioda je vzdálena o 6,90 mm (označení P). Vzdálenost mezi štěrbinou a fotodidou je 5,03 mm [40].

Měření pomocí BP109-IR má samozřejmě také své nevýhody. Při analýze naměřených hodnot se mohou vytvořit menší nepřesnosti zapříčiněné zprůměrováním získaných vzorků. I když toto způsobí částečné zkreslení paprsku, tento postup je doporučenou metodou. Tento způsob měření není normativní metodou podle norem ČSE EN, ale je to zatím nejpříjemnější způsob jak získat dané parametry.



Obrázek 26: Vzdálenost štěrbiny a fotodiody v mobilní hlavě zařízení BP109-IR

5.4.2 Jiné možnosti měření

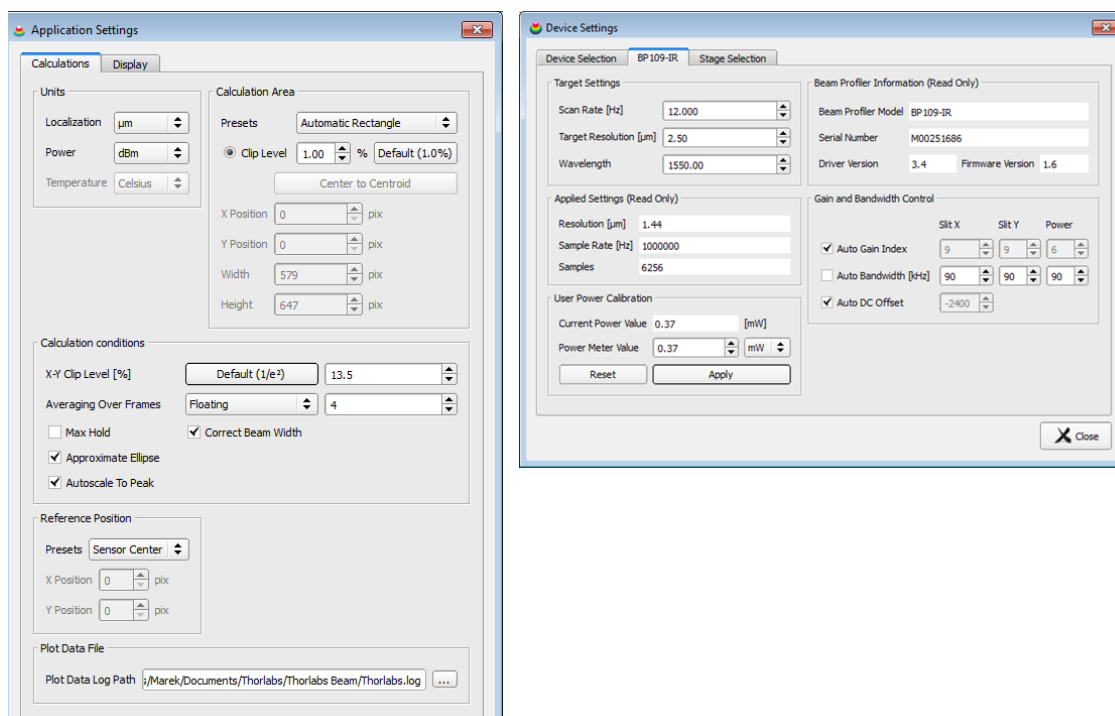
Jako možná alternativa místo BP109-IR se nabízí použití CCD (Charged Coupled Device) nebo CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) kamer od firmy Thorlabs. Jsou to kvalitní kamery navrženy pro mikroskopii. Toto řešení by bylo ideální v případě měření paprsku, jehož tvar není blízký Gaussova rozložení. Tyto sledovací kamery jsou navíc finančně náročné. Stávající měření pomocí BP109-IR, založené na metodě skenovací štěrbiny, je dostačující. Tvar měřeného paprsku je blízký Gaussova rozložení, což je pro tuto metodu ideální.

5.4.3 Program Thorlabs Beam

Kompatibilní s přístrojem BP109-IR je volně stažitelný software Thorlabs Beam, který obsahuje balíček s ovladači pro komunikaci mezi hardwarem a počítačem přes USB port. Nejaktuálnější je verze 6.2 z 19. června 2016, ale pro všechna měření byla použita verze 6.0. Verze 6.0 byla nejaktuálnější v začátcích měření, je pořád funkčně a kompatibilně dostačující. Pomocí tohoto

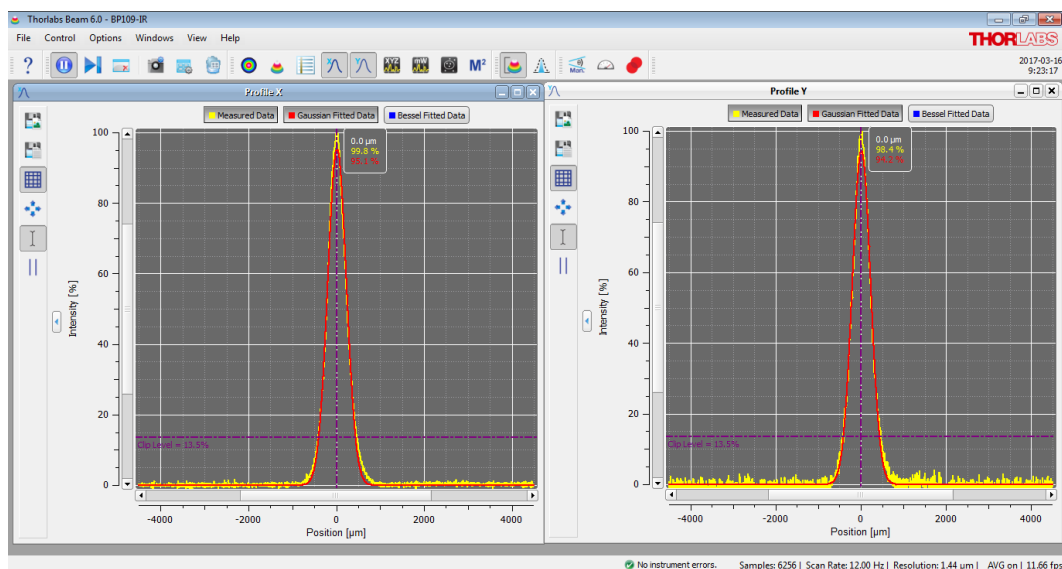
programu jsem sledoval Gaussovo rozložení skenovaných profilů na ose X a Y, 2D a 3D grafické modely prostorového šíření energie v optickém vlákne. Dále jsem na průřezích na ose X a Y měřil rozměry MFD a FWHM. Díky Thorlabs Beam lze ještě získat parametry jako např. elipticita nebo divergence, ale ty jsem neměřil. Data je možné ukládat jako obrázek, textový či Excelovský dokument.

Program ihned rozpozná zařízení po zapojení. Před měřením bylo nutno v záložce Options/Device Settings/BP109-IR nastavit rychlost skenování (rychlost otáčení rotačního bubnu) na 12 Hz, rozlišení terčiku $2,5\text{ }\mu\text{m}$. Dále z důvodu snížení úrovně šumu šířku pásma 90 kHz pro výkon a šterbiny ve směru X, Y, výkon laserového paprsku v mW a správnou vlnovou délku, která je nutná pro přesné výsledky měření. Výkon laserového paprsku byl před každým měřením kalibrován pomocí informativního měřidla Noyes OPM4. Vzorkovací frekvence je automaticky vypočtena na základě rychlostí skenování a rozlišení. Vzorky, což jsou zobrazované datové body, jsou též automaticky vypočteny na základě rychlosti skenování, rozlišení a šířky šterbiny ($5\text{ }\mu\text{m}$). Dále v záložce Options/Application Settings/Calculations bylo potřeba nastavovat 13,5 a 50,%. Výchozí hodnota je zvolena na $1/e^2$ což je 13,5% z maxima, kterou měříme parametr MFD. Pro měření FWHM se volí 50,%, tedy 1/2 maxima výkonové křivky. Jako poslední krok se zprůměroval počet rámců na hodnotu 4. Zvolením hodnoty nad 1 se potlačuje šum. Zvolený počet snímků se zprůměruje a pouze tyto zprůměrované snímky jsou využity pro výpočty hodnot. Ostatní neuvedené parametry nebylo potřeba měnit. Nastavení v obou záložkách je zobrazeno na obrázku 27.

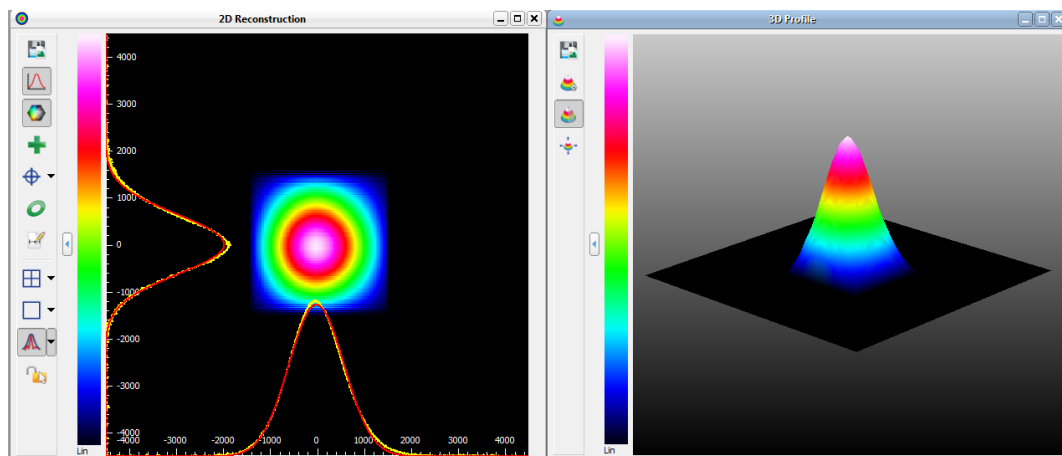


Obrázek 27: Nastavení parametrů v programu Thorlabs Beam

Při měření bylo potřeba sledovat Gaussovo rozložení skenovaných profilů na ose X a Y, které se pomocí přístroje BP109-IR umístily na střed kurzoru kvůli přesnějším výsledkům. Měření je vidět na obrázku 28. Pomocí těchto dvou oken jsem při měření každé větve ukládal měřené data spolu s grafickým zobrazením. Vodorovná čára znázorňuje kurzor procentuální hodnoty z maxima výkonové křivky, tedy v tomto případě probíhalo měření MFD. Dále jsem v záložce Quality Measurement posunoval měřicí hlavu o vzdálenost 1 cm od stojanu s měřeným vláknem. Na obrázku 29 je vidět 2D a 3D zobrazení rozložení energie [40].



Obrázek 28: Rozložení energie paprsku na ose X a Y v programu Thorlabs Beam

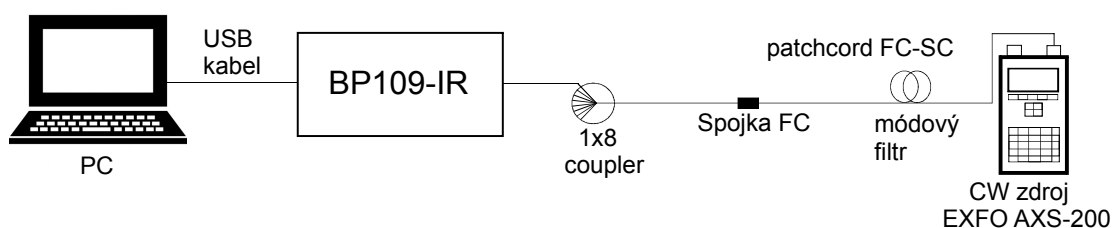


Obrázek 29: 2D a 3D rozložení energie v programu Thorlabs Beam

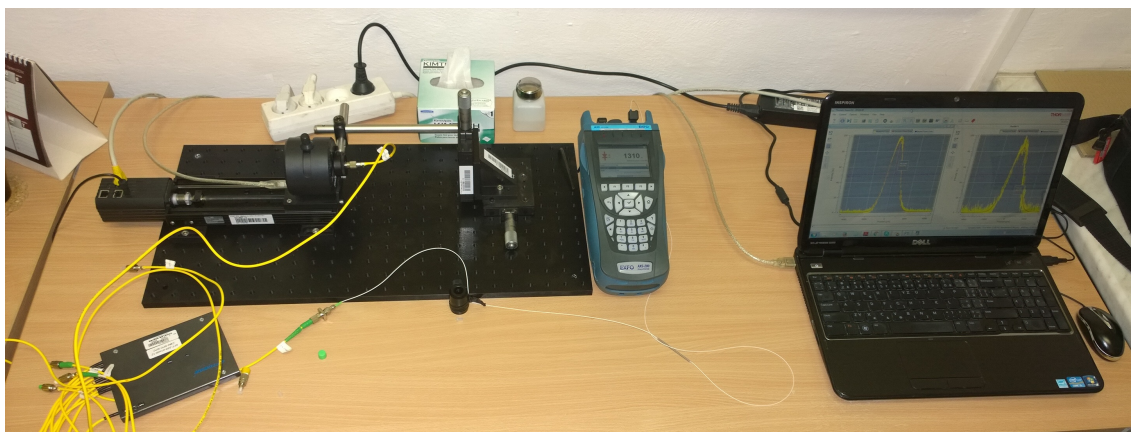
5.5 Měřicí pracoviště

Jak již bylo zmiňováno v předchozích kapitolách, couplery byly výkonem a teplem zatěžovány určitou dobu. Poté probíhalo měření a porovnávání jednotlivých výstupů couplerů před a po zatížení. Měření jsem rozdělil na dvě části, protože průběžným získáváním hodnot byly zjištěny různé nedostatky a bylo potřeba je vyřešit odlišným způsobem měření.

5.5.1 Měření s nestabilním laserem



Obrázek 30: Blokové schéma měření s nestabilním laserem

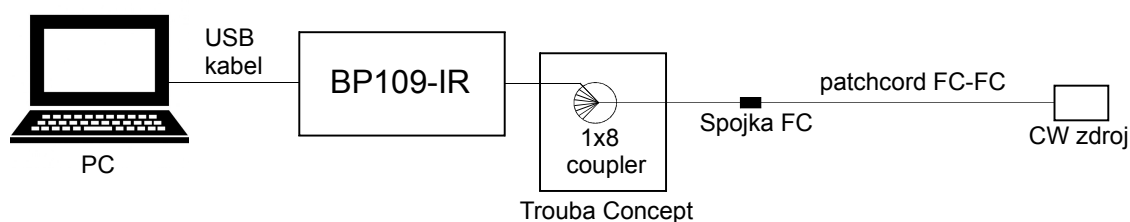


Obrázek 31: Foto pracoviště při měření couplerů s nestabilním laserem

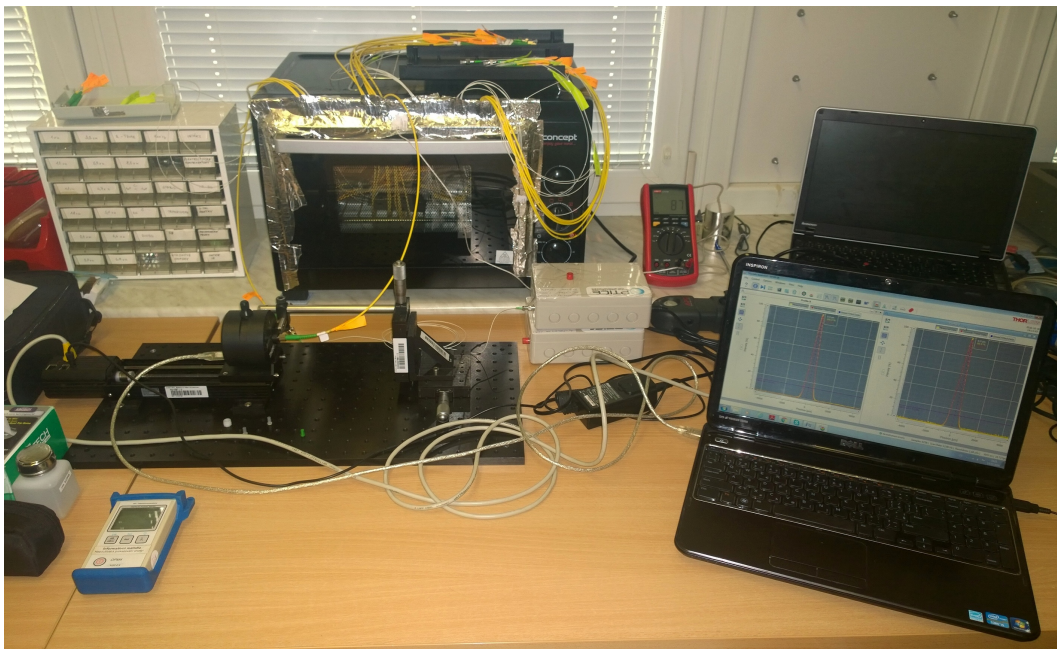
Pro měření se využívala měřicí sestava, jejíž blokové schéma je zobrazeno na obrázku 30. Byly využity dva SM couplery (1:8) SFT-S35-01x08-12 CM4-NPC-NPC značky OPTOKON, kde jeden byl zatížen teplem a druhý výkonem. Měření probíhalo při pokojové teplotě přibližně 25 °C při konstantních podmínkách, tedy bez povětrnostních vlivů. Před každým měřením jsem samozřejmě všechny konce vláken očistil isopropylalkoholem a zkontroloval mikroskopem. Na vstupu byl připojen CW laserový zdroj EXFO AXS-200 SharpTester, pomocí něhož probíhalo měření na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Ze zdroje vedl patchcord FC-SC, který byl 5x ovinutý kolem válečku o průměru 3,2 cm. Toto ovinutí představuje módový filtr (Mandrel Wrap), který slouží k filtrování módů vyšších harmonických. Na tento FC-SC patchcord byla připojena vstupní větev coupleru. Na každé výstupní větvi byl měřen optický výkon v μW

pomocí informativního měřidla Noyes OPMM4 pro obě vlnové délky. Tato hodnota byla využita ke kalibraci softwaru Thorlabs Beam. Takže výstupní větve byly jednotlivě zapojeny do zařízení BP109-IR, které bylo kompatibilní se softwarem Thorlabs Beam v počítači. Softwarem jsem sledoval výstup přístroje BP109-IR, hlavně šlo o grafy složek signálu pro osy X a Y. Pomocí BP109-IR jsem mohl jemně nastavovat polohu vstupujícího signálu. Pro přesnější získání hodnot jsem nastavil polohu signálu na osách tak, aby se maximum signálu nacházelo ve středu grafu. Takto probíhalo měření pro všech 8 větví. Získal jsem grafické znázornění osy X, Y, hodnoty MFD a FWHM, 2D a 3D zobrazení paprsku. Foto pracoviště je na obrázku 31.

5.5.2 Měření se stabilním laserem při kontinuálním tepelném zatěžování



Obrázek 32: Blokové schéma měření se stabilním laserem při kontinuálním tepelném zatěžování



Obrázek 33: Foto pracoviště při měření se stabilním laserem při kontinuálním tepelném zatěžování

Po čtvrtém zatížení teplem se několik konektorů na coupleru zničilo a nedaly se získat seriózní výsledky. Řešil se problém s laserem, protože laserový zdroj EXFO AXS-200 SharpTester se ukázal jako nestabilní a ve výsledcích se projevila větší míra šumu. Pro měření byly použity dva nové stabilní laserové zdroje pracující na vlnových délkách 1580,317 nm a 1309,25 nm (obrázek 34), což byl jeden z předpokladů k dosažení lepších výsledků a snížení zkreslení. Blokové schéma nové měřicí soustavy je na obrázku 32. Výkonem byl zatěžován nový coupler značky Optokon. Kontinuálně teplem byly zatíženy dva couplery, jeden značky Optokon a druhý čínský Gezhi. Jejich konektory vyčnívaly ven, takže měření probíhalo současně se zatížením. Výsledný výstupní výkon laserů byl zaznamenáván stejným způsobem, přibýlo pouze měření ve vzdálenosti 1 cm od mobilní hlavy. Foto pracoviště je na obrázku 33.

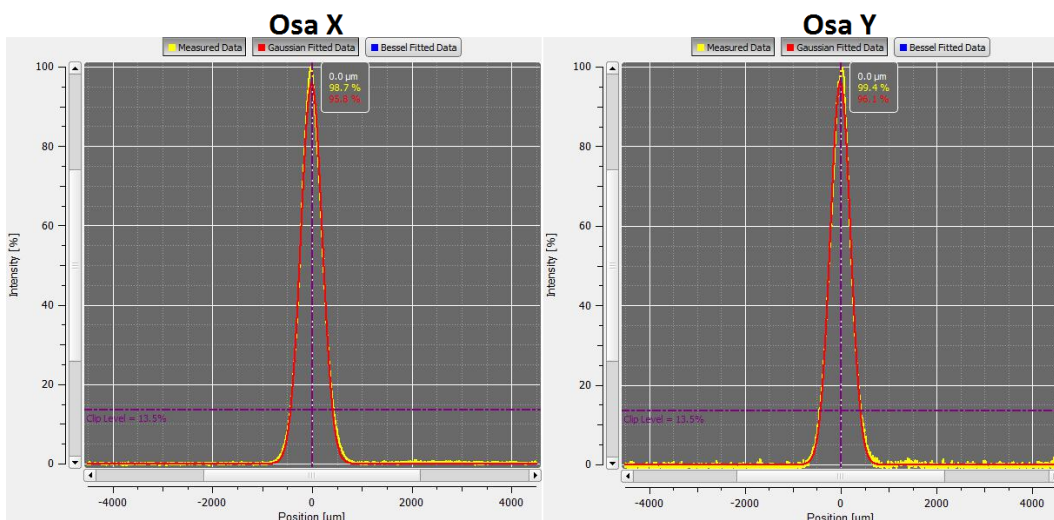


Obrázek 34: Stabilní laserové zdroje pracující na vlnových délkách 1580,317 nm a 1309,25 nm

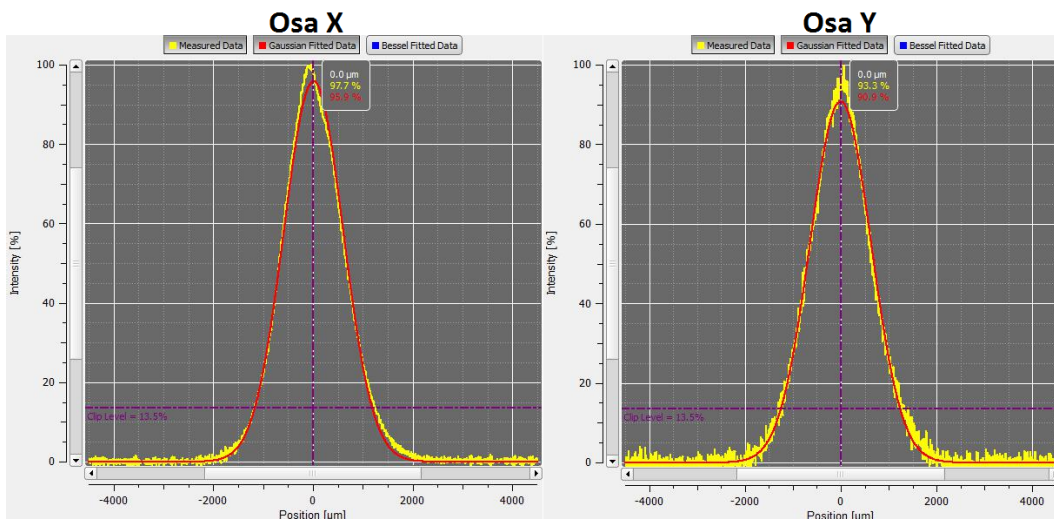
6 Analýza získaných výsledků

Z naměřených výsledků bylo vygenerováno velké množství grafů. Měření probíhalo tak, že výstupní větve byly od mobilní hlavy vzdáleny ve vzdálenosti 0 a 1 cm. Ve skutečnosti je ale laserový paprsek detekován v nepatrně větší vzdálenosti, protože fotodioda je umístěna přibližně 6,90 mm od začátku hlavy. Profil hlavy je na obrázku 26, kde je vzdálenost 6,90 mm označena jako P.

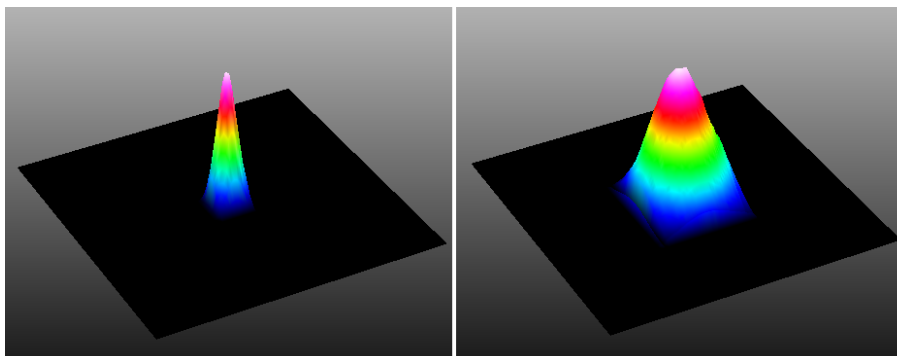
Ve vzdálenosti 0 cm bylo naměřeno úzké spektrum, kde nebyly tak zřetelné změny. Proto jsem se v práci zaměřil na měření ve vzdálenosti 1 cm, kde jsou změny lépe pozorovatelné. Na obrázcích 35 36 je vidět rozdíl v šířce řezu při měření v programu Thorlabs Beam. Tento rozdíl je také patrný na obrázku 37, kde je laserový paprsek zobrazen v 3D.



Obrázek 35: Měření MFDeff ve vzdálenosti 0 cm



Obrázek 36: Měření MFDeff ve vzdálenosti 1 cm



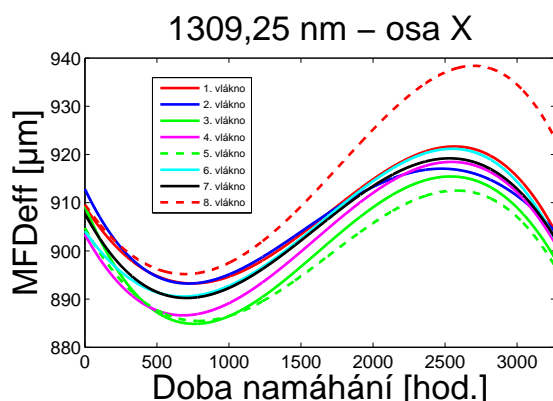
Obrázek 37: Porovnání laserového paprsku ve vzdálenosti 0 a 1 cm v 3D

V dalších částech této kapitoly budou popsány grafy a výsledky, které jsou vhodné pro uvedení či porovnání. Ostatní grafy a tabulky s hodnotami budou vloženy v příloze. Vždy jsou uvedeny grafy pro oba snímané profily, respektive v ose X a Y. V každém grafu je zobrazení všech osmi výstupních vláken, dále na ose x je uvedena doba zatížení v hodinách a na ose y je zobrazena efektivní hodnota MFD nebo FWHM. Tyto uvedené efektivní hodnoty jsou několikanásobně větší než klasický parametry MFD pro SM vlákna, protože paprsek se šíří prostorem a vzniká ohyb, nebo-li difrakce. Respektive paprsek je rozšířen. U všech grafů je možné pozorovat, že každá větev se chová jinak. Parametry MFD_{eff} a FWHM_{eff} daného vlákna nikdy nebyly stejné pro ostatní vlákna. Z toho lze vydedukovat, že nelze vyrobit couplery s dokonale stejnými výstupními vlákny.

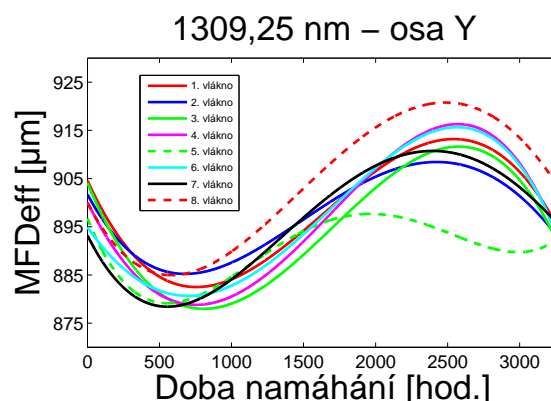
6.1 Teplotní zatížení čínského coupleru Gezhi

Zde je uvedeno měření teplotně zatíženého čínského coupleru Gezhi. Pro porovnání je uvedeno měření v obou vzdálenostech (0 a 1 cm) pro obě vlnové délky (1309,25 a 1580,317 nm).

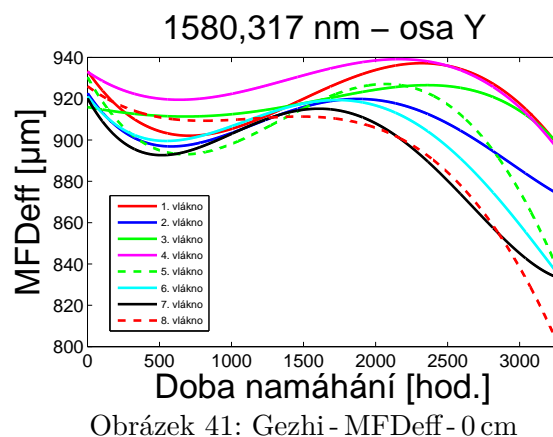
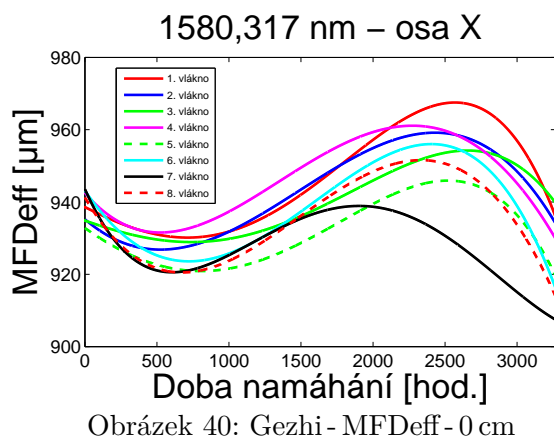
• Vzdálenost 0 cm



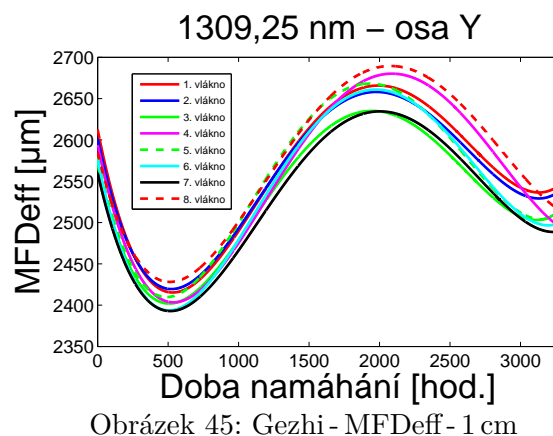
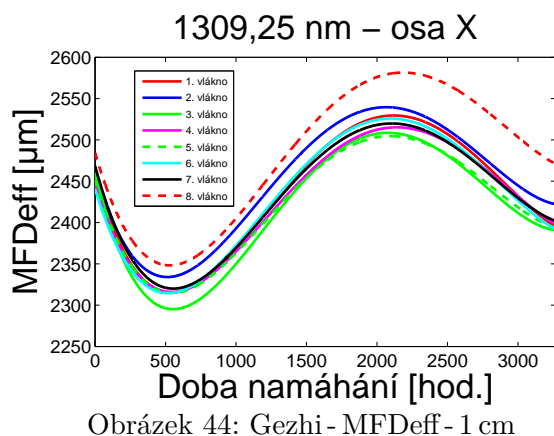
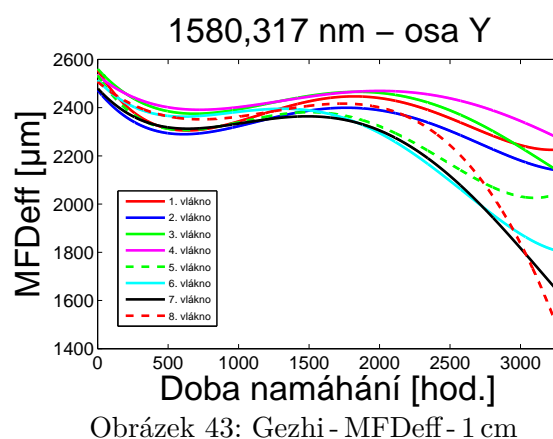
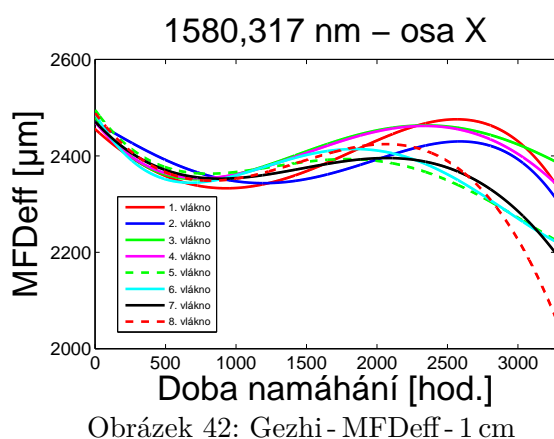
Obrázek 38: Gezhi - MFD_{eff} - 0 cm



Obrázek 39: Gezhi - MFD_{eff} - 0 cm



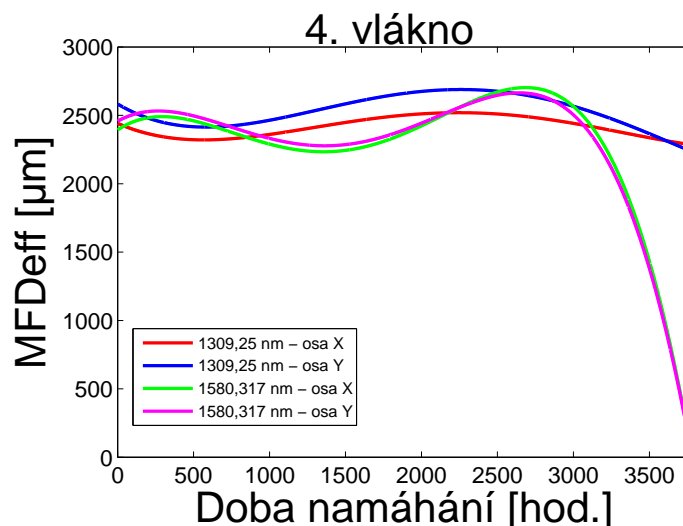
• Vzdálenost 1 cm



Je vidět, že ve vzdálenosti 1 cm byly hodnoty MFDeff o více jak 1000 μm větší. Rozsah MFDeff a FWHMeff byl rovněž větší, proto bylo možno lépe pozorovat jak se hodnoty mění.

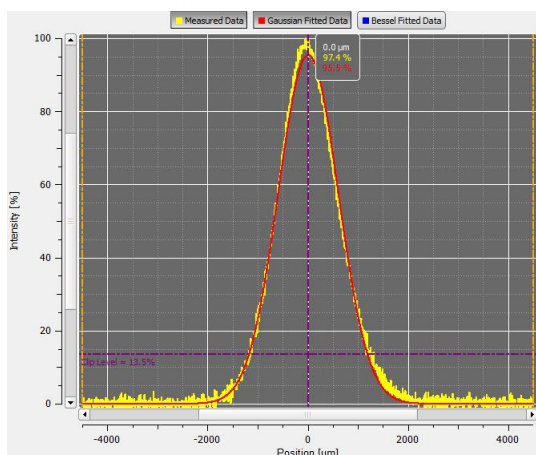
Pro 1580,317 nm měly hodnoty spíše klesající charakter než pro 1309,25 nm. Pro 1309,25 nm je vidět nárůst hodnot a přibližně při 2200 hodinách namáhání se hodnoty začínají měnit a nastává pokles. Coupler byl po 3771 hodinách zničen. V grafech výše není uvedena poslední hodnota namáhání kvůli zkreslení výsledků. Konečné zatížení v grafu je pro 3267 hodin.

Poslední hodnota zatížení je uvedena až v grafu pro 4. větev na obrázku 46. Zde je uvedeno měření pro obě vlnové délky ve vzdálenosti 1 cm. Pro 1580 nm zařízení BP109-IR nebylo již schopno detekovat žádné hodnoty. Toto je pozorovatelné i v grafu níže.

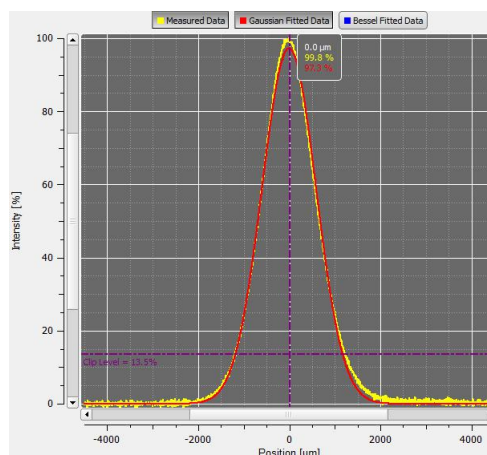


Obrázek 46: Gezhi - Měření MFDeff ve vzdálenosti 1 cm pro 4. větev

6.2 Výkonové zatížení coupleru



Obrázek 47: Nestabilní laser - 0 cm

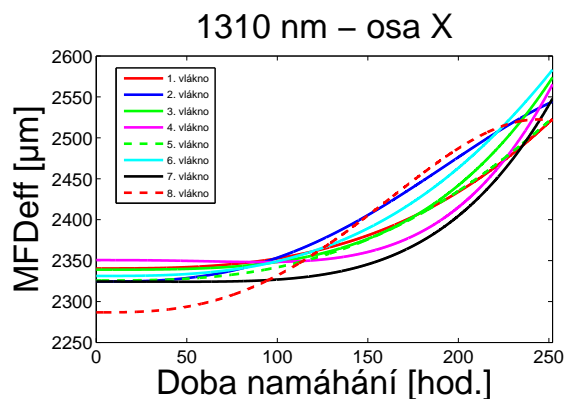


Obrázek 48: Stabilní laser - 1 cm

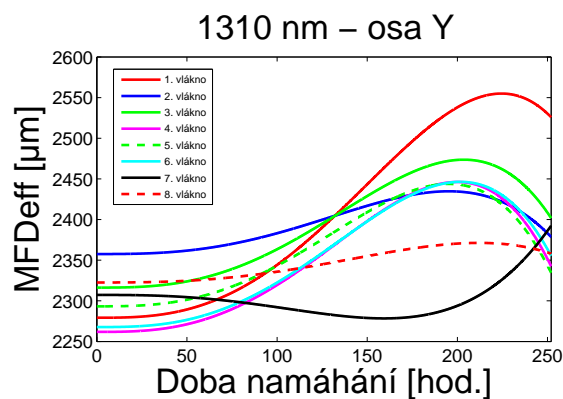
V této části je uvedeno měření coupleru po výkonovém zatížení. Jedná se ale o měření s nestabilním laserem, kdy byly výsledky částečně zkresleny. Měření bylo prováděno při vzdálenosti

0 cm. Na obrázku 47 je skenovaný profil Gaussovského svazku, který byl při 0 cm stejně velký jako při měření ve vzdálenosti 1 cm se stabilními lasery 48. Proto bylo započato měření s novým couplerem a stabilními lasery. Oba obrázky jsou skenovány v ose X.

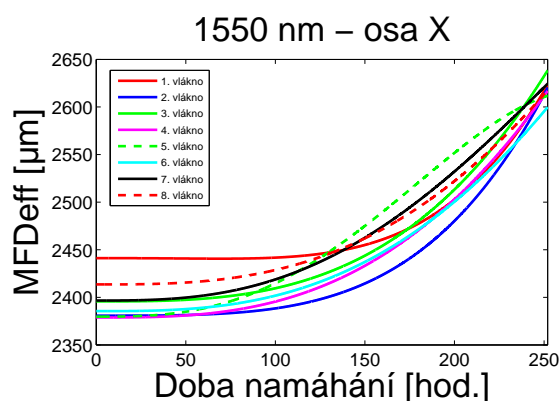
Byly provedeny dva cykly namáhání s konečným výsledkem 250 hodin. Z grafů níže je vidět, že hodnoty narůstaly po 170hodinovém zatížení a na ose Y byl pozorovatelný pokles po asi 200 hodinách. Měření probíhalo pro 1310 a 1550 nm. Měření se stabilním laserem pro výkonové zatížení je uvedeno až v kapitolách níže, společně s tepelným namáháním.



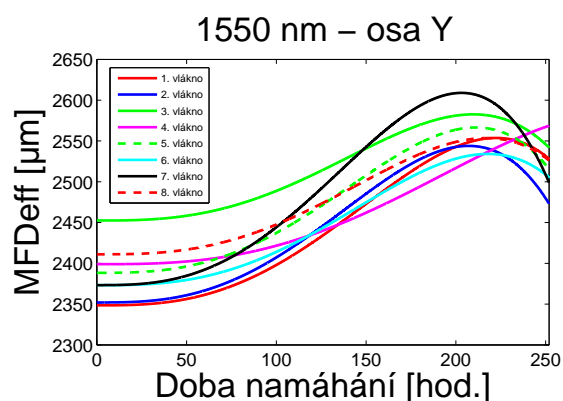
Obrázek 49: Opto - MFDeff - 0 cm



Obrázek 50: Opto - MFDeff - 0 cm



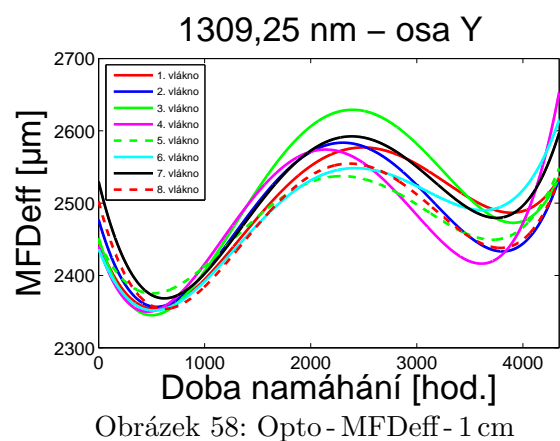
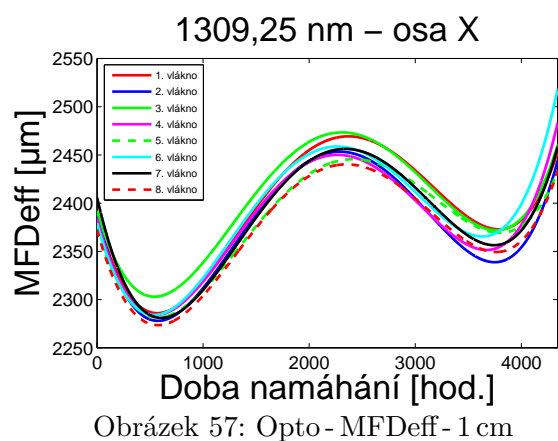
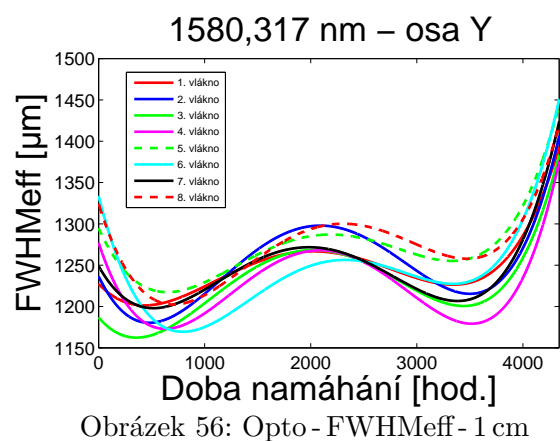
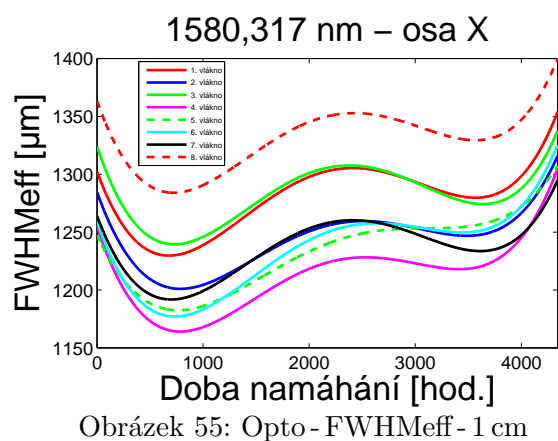
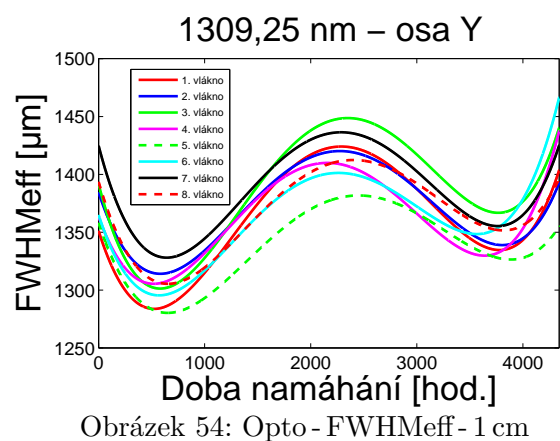
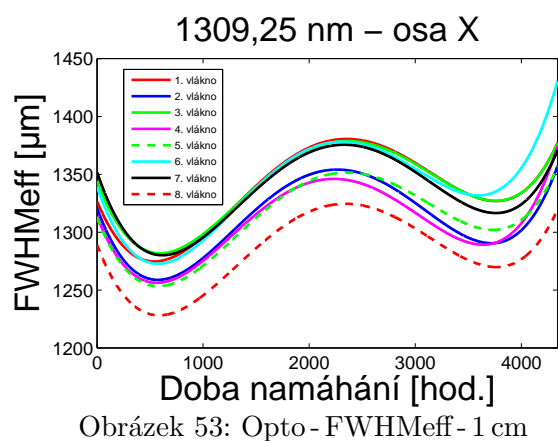
Obrázek 51: Opto - MFDeff - 0 cm

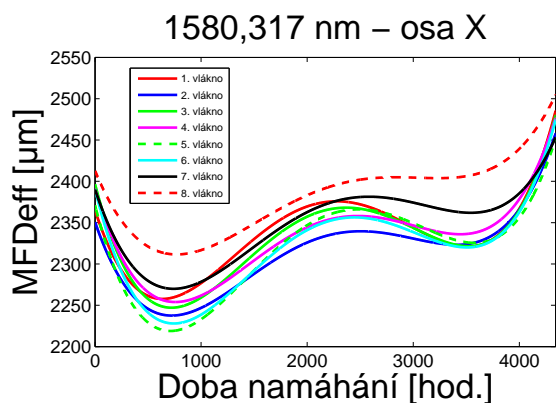


Obrázek 52: Opto - MFDeff - 0 cm

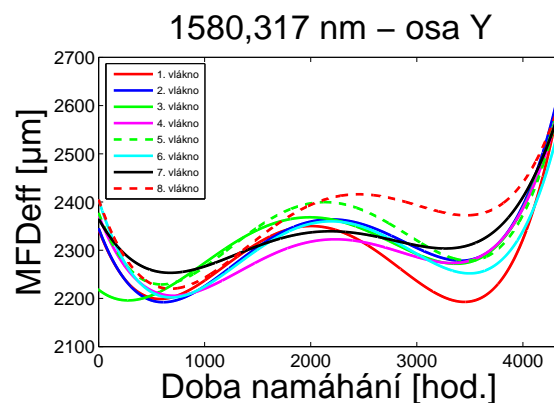
6.3 Teplotní a následně výkonové zatížení

V této podkapitole je uvedeno zatěžování a měření Coupleru Optokon. Coupler byl zatěžován 3771 hodin teplem a následně z časových důvodů pouze 570 hodin výkonem, celkem tedy 4341 hodin. Uvedl jsem níže grafy pro všechna měření ve vzdálenosti 1 cm. Přibližně při namáhání 2200 hodin se hodnoty začaly měnit a postupně klesaly. Toto je lépe vidět pro 1309,25 nm. Po 3771 hodinách byl coupler namáhán výkonem. Toto namáhání způsobilo, že hodnoty v grafech se po 3771 hodinách opět začaly zvyšovat.



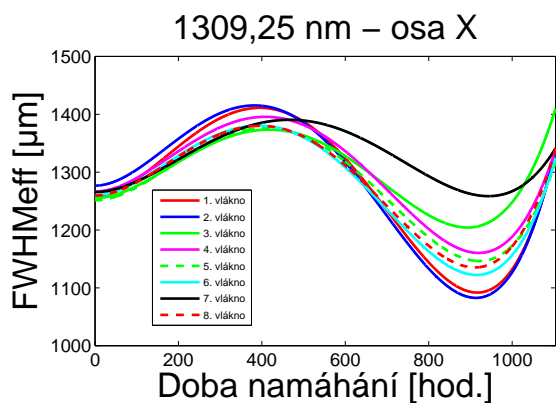


Obrázek 59: Opto - MFDeff - 1 cm

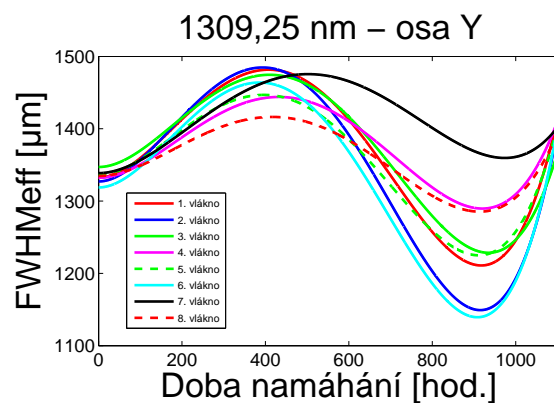


Obrázek 60: Opto - MFDeff - 1 cm

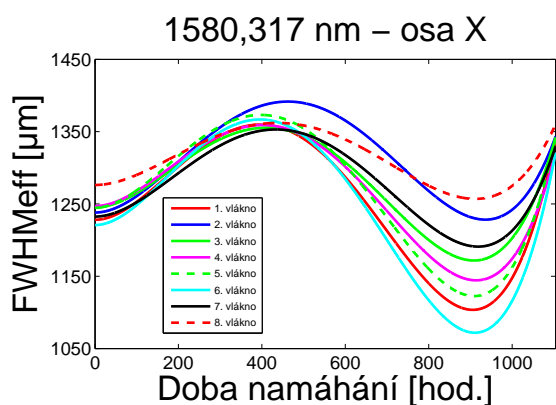
6.4 Výkonové a následně tepelné zatížení



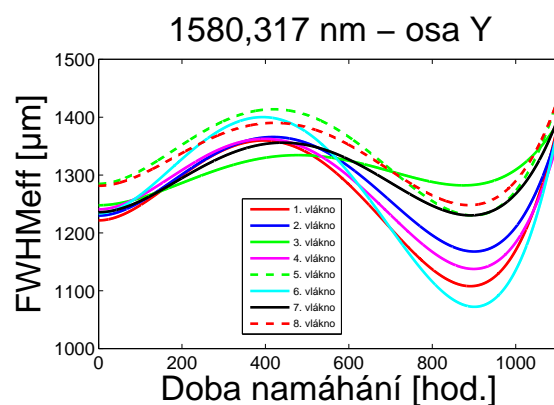
Obrázek 61: Opto - FWHMeff - 1 cm



Obrázek 62: Opto - FWHMeff - 1 cm



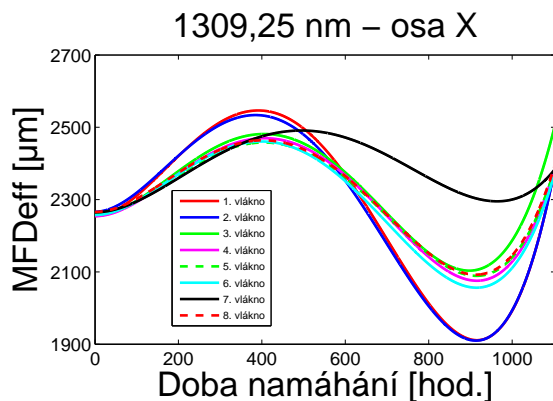
Obrázek 63: Opto - FWHMeff - 1 cm



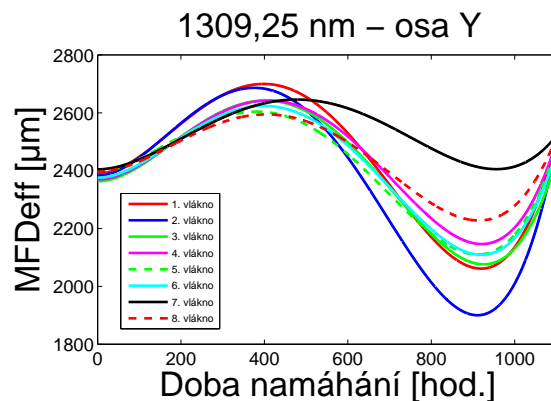
Obrázek 64: Opto - FWHMeff - 1 cm

Zde je opět uvedeno zatěžování a měření Coupleru Optokon, ale tento Coupler byl zatěžován nejprve 573 hodin výkonem a následně 570 hodin teplem, celkem tedy 1143 hodin. Všechna uve-

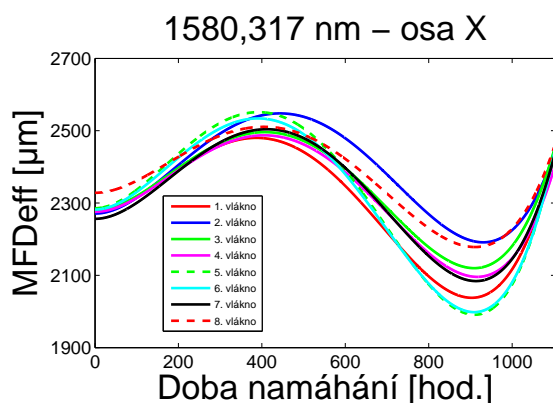
dená měření jsou pro vzdálenost 1 cm. Přibližně při 400 hodinách namáhání výkonem se hodnoty začaly měnit a postupně klesaly. Je to patrné pro obě vlnové délky oproti předchozímu zatěžování teplo + výkon. Po 573 hodinách byl coupler namáhán teplem. Hodnoty nezačaly hned růst jako v předchozím případě, ale nejprve klesaly a přibližně až při 900 hodinách opět narůstaly.



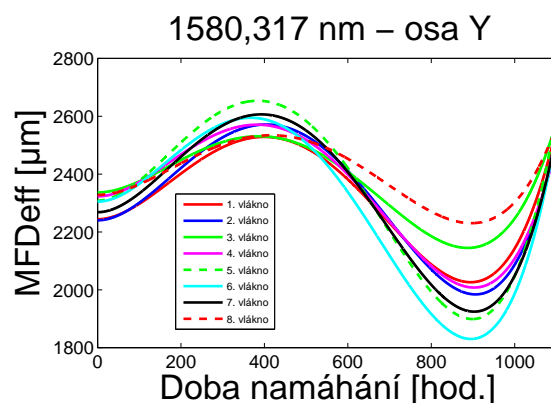
Obrázek 65: Opto - MFDeff - 1 cm



Obrázek 66: Opto - MFDeff - 1 cm



Obrázek 67: Opto - MFDeff - 1 cm



Obrázek 68: Opto - MFDeff - 1 cm

6.5 Diskuze

Z grafů pro zatížení teplo + výkonem je vidět, že při tepelném zatížení hodnoty nejprve klesají a přibližně při 1000 hodinách narůstají. Dále po asi 2200 hodinách zase klesají a hned po ukončení tepelného zatížení vzrostou hodnoty vlivem výkonového namáhání.

U zatížení výkon + teplo měřené parametry v podstatě neklesnou a hned narůstají. Už po 400 hodinách graf klesá. Následkem tepelného namáhání má graf opět klesající charakter, ale už po 300 hodinách vznikne nárůst.

Také je možné pozorovat v obou případech zatížení, že v místě zlomu mají měřené parametry MFDeff a FWHMeff stejné maximální hodnoty. Pro FWHMeff je to 1400-1500 μm a pro MFDeff 2400-2500 μm pro vzdálenost 1 cm. U zatížení teplo + výkon tyto parametry kontinuálně rostly

po výkonovém zatížení až nad tyto hodnoty. U zatížení výkon + teplo křivka po tepelném zatížení končila na hranici uváděných maximálních hodnot. Měření dále nepokračovalo z časových důvodů. Z výsledků je zřejmé, že couplery se chovají jinak po těchto dvou namáhání. U výkonového zatížení se parametry začínají měnit podstatně dříve a proto se vysoký optický výkon jeví jako horší varianta. U kombinace tepla a následně výkonu se výkon projevoval výrazněji.

Parametry MFDeff a FWHMeff byly pro každou větev měřeny pětkrát při obou vzdálenostech. Vychýlené hodnoty byly odstraněny a zbylé zprůměrovány. Zde je uvedena tabulka 7 s měřením FWHMeff pro 1580,317 nm, konkrétně pro Optokon zatěžovaný teplem a následně výkonem. Tabulka je uvedena pro příkladnou ukázkou, ostatní tabulky se nachází v příloze.

Tabulka 7: Měření FWHMeff při 1580,317 nm pro teplo + výkon

FWHMeff - Optokon - 1 cm ($\lambda=1580,317$ nm)										
Větev	Osa	Čas zatížení [hod.]								
[-]	[μm]	0	195	531	867	1611	2571	3267	3771	4771
1	x	477,86	467,75	476,74	477,87	481,48	495,53	479,69	487,02	485,81
	y	469,81	453,17	466,07	463,44	478,24	489,77	466,48	472,12	475,20
2	x	475,51	466,03	465,48	468,11	474,72	481,40	464,84	473,23	477,40
	y	476,85	451,83	464,19	463,83	470,94	474,81	458,34	466,75	471,63
3	x	485,30	476,18	485,27	477,58	477,66	493,51	474,53	487,46	481,89
	y	478,35	468,42	483,19	468,11	475,34	494,83	467,89	481,59	474,66
4	x	474,75	461,59	463,12	464,64	466,49	472,53	462,59	468,35	506,83
	y	466,74	457,50	455,92	452,92	465,68	465,49	456,26	463,87	501,13
5	x	476,84	461,97	466,39	466,24	474,15	477,61	467,20	473,90	474,49
	y	460,88	459,93	445,41	452,34	463,04	465,81	455,35	462,83	461,77
6	x	481,97	469,92	483,55	476,92	488,11	493,60	481,01	485,23	536,54
	y	462,49	461,85	465,98	451,46	473,78	474,93	461,70	471,49	529,12
7	x	493,53	481,15	476,99	485,04	490,04	493,44	479,82	488,10	488,60
	y	461,37	494,52	451,44	464,18	456,00	478,55	447,57	466,15	465,63
8	x	467,91	462,24	459,94	462,36	464,29	474,20	461,95	467,64	469,02
	y	477,25	470,10	461,88	464,01	464,85	478,40	463,41	467,84	467,15

Lze vytvořit predikci na základě parametrů MFDeff a FWHMeff po ukončení namáhání. Predikce se řeší na základě regresních modelů. Nejčastěji se provádí predikce pomocí lineární regrese. Pro tyto měřené parametry je vhodný model nelineární regrese. Ten se vyznačuje tím, že se do základního lineárního modelu přidávají polynomicke prvky. Např. první větev, při měření FWHMeff v zatížení teplo + výkon ve vzdálenosti 1 cm, má při aproximaci čtvrtého řádu matematický tvar:

$$y = 1 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 1 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 0,0003 \cdot x^2 - 0,2192 \cdot x + 1326,7. \quad (19)$$

Na základě výsledků v tomto tvaru se řeší predikce dále. V práci predikce nebyla řešena prakticky. Více např. zde [41].

7 Závěr

Úvodem jsou popsány parametry geometrie optického svazku, které jsou potřebné pro pochopení výsledného měření. Zde byly potřeba uvést hlavně parametry MFD a FWHM, na jejichž základě bylo prováděno měření. V další části je detailně popisován optický coupler, který pracuje na principu vlnovodné vazby. Dále jsou zde uváděny oblasti použití, různé dělicí poměry, přenosové parametry a vložné útlumy pro daný počet portů. Couplery se vyrábí technologiemi FBT a PLC.

Tato diplomová práce se věnuje problematice stárnutí optických vláknových couplerů. Stárnutí optických prvků je problematika, které je třeba věnovat pozornost. První optické prvky nebyly vyrobeny pro potřeby dnešní doby. Proto je v práci podrobně popsán způsob umělého stárnutí optických prvků. Umělé stárnutí nastává, pokud optický coupler vystavíme extrémním podmínkách. K stárnutí dochází vlivem vysoké teploty, výkonu, gama záření, mechanickým namáháním nebo vodíku. Pro lepší přehled o této problematice jsou v práci uvedeny a popsány různé publikace na toto téma.

Praktická část se zabývá teplotním a výkonovým zatěžováním optických couplerů. Zatěžování teplem probíhalo při teplotě $95\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, která byla měřena pomocí multimetru. Namáhání teplem probíhalo dvěma způsoby. Nejprve byl coupler firmy Optokon umístěn celý do trouby a zatěžování probíhalo po cyklech. Po čtvrtém cyklu, celkem po 859 hodinách, došlo k poškození plastové ochrany na konektoru a měření bylo zkeslováno. Toto bylo nežádoucí pro další analýzu, proto byl započat druhý způsob zatěžování. Nyní namáhání probíhalo kontinuálně a couplery byly umístěny tak, aby se jejich konektor nepoškodil. Pro tento způsob byl použit coupler firmy Optokon a čínský coupler Gezhi pro lepší porovnání. Konečná hodnota namáhání teplem se zastavila na 3771 hodinách. Čínský coupler byl po této zátěži zničen.

Výkonové zatížení probíhalo pomocí dvoustupňového zesilovače EDFA s výsledným výstupním výkonem 250 mW. Zde byl opět využit coupler firmy Optokon. Proběhly dva cykly zatížení s celkovou hodnotou 250 hodin.

Po uvedených konečných časových hodnotách se provedla kombinace zatížení. Coupler namáhaný teplem byl dále zatížen výkonem po dobu 570 hodin, celkově s teplem 4341 hodin. Druhý coupler namáhaný výkonem byl dále 531 hodin zatěžován teplem, celkem tedy 1104 hodin.

Pro měření bylo použito zařízení BP109-IR, na kterém se zaznamenávala efektivní hodnota MFD a FWHM pro každou výstupní větev. Měření probíhalo tak, že výstupní větve byly od mobilní hlavy vzdáleny ve vzdálenosti 0 a 1 cm. Pro větší vzdálenost byly lépe pozorovatelné změny kvůli širšímu spektru, proto jsem se zaměřil na vzdálenost 1 cm. U čínského coupleru po 3771 hodinách zatížení nebyly možné změřit již žádné hodnoty pro 1580,317 nm. Coupler Optokon byl odolnější, protože je vyroben z odolnějšího materiálu. U Optokonu hodnoty začaly nejprve klesat a přibližně při 1000 hodinách opět narůstaly. Při 2200 hodinách se hodnoty však začaly měnit a znovu klesat. Po započetí výkonového namáhání hodnoty opět narostly. U výkonového zatížení na začátku měřené parametry v podstatě neklesnou a hned narůstají. Ale už

po 400 hodinách se hodnoty začínají měnit a graf klesá. Následkem tepelného namáhání má graf opět klesající charakter, ale už po 300 hodinách vznikne nárůst.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že couplery se chovají jinak po těchto dvou namáhání. U výkonového zatížení je vidět, že se parametry začínají měnit podstatně dříve a proto se vysoký optický výkon jeví jako horší varianta. U kombinované formy, při tepelném a následně výkonovém zatížení, se výkon projevoval výrazněji. Měřené hodnoty byly výrazně vyšší než při tepelném namáhání, překročili dokonce maximální hodnoty prvního zlomu. Parametry $MFDeff$ a $FWHMeff$ jednoho vlákna nikdy nebyly stejné pro ostatní vlákna. Z toho lze vydedukovat, že nelze vyrobit couplery s dokonale stejnými výstupními vlákny. Na toto konkrétní téma, kdy byly měřeny ty samé parametry při stejném způsobu namáhání, bylo publikováno malé množství prací. Proto nelze zatím určit jestli se coupler na základě těchto výsledků má měnit či ne. Jsou potřebné další pokusy pro potvrzení získaných informací o chování couplerů.

Literatura

- [1] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] VAŠINEK, V. *Optické komunikace 1 pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3675-1.
- [3] BUBNÍK, L., KLAJBL, J., MAZUCH, P. *Optoelektrotechnika*. Brno: Střední škola informatiky, poštovníctví a finančnictví Brno, 2015. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/06.html>. ISBN 978-80-88058-20-5.
- [4] PÁPEŠ, M., JAROŠ, J. *Optické komunikace 2*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2015.
- [5] VAŠINEK, V. *Optické komunikace 1*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013.
- [6] ČSN EN 60793-1-45. *Optická vlákna - Část 1-45: Průměr vidového pole*. Český normalizační institut, 2004.
- [7] PERECÁR, F. a kol. *The Impacts of Ageing Effects Due to Radiation Burden on Optical Fiber Couplers*. Ostrava: VŠB – TUO, 2014. Dostupné z: <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2187517>.
- [8] ČSN EN 60793-1-20. *Optická vlákna - Část 1-43: Měřicí metody a zkušební postupy – Rozměry vlákna*, ed 2. Český normalizační institut, 2015.
- [9] JANOVSÝ, M. *POF - polymerová optická vlákna*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 54 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [10] KOUŘIL, M. *Charakterizace vláknových děličů svazku*: bakalářská práce. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Společná laboratoř optiky, 2013. Vedoucí práce byl Mgr. Michal Mičuda, Ph.D.
- [11] SHUAI, Ci-jun, Ji-an DUAN a Jue ZHONG. *Effect of technological parameters on optical performance of fiber coupler*. In: Journal of Central South University of Technology. 2007, 14(3), s. 370-373. DOI: 10.1007/s11771-007-0073-5. ISSN 1005-9784.
- [12] ALEGRIA, C. *Introduction to Fibre-Couplers*. Southampton: University of Southampton, The Optoelectronics Research Centre. Dostupné z: http://www.orc.soton.ac.uk/publications/theses/2580_ca/alegriach4.pdf

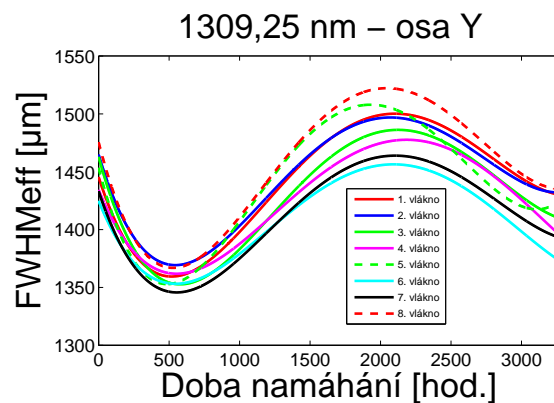
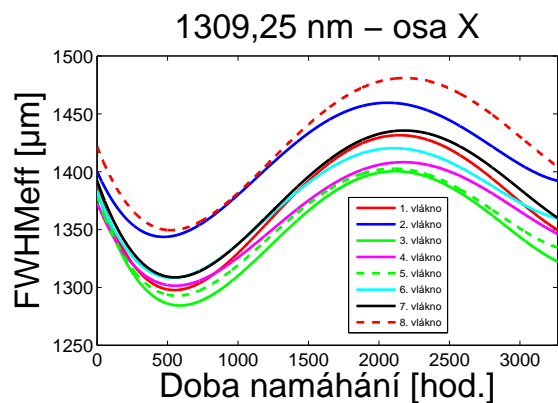
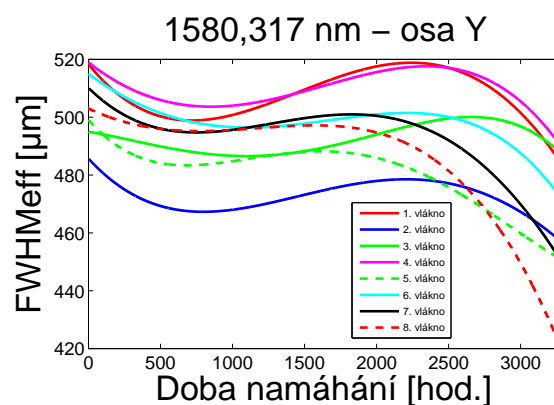
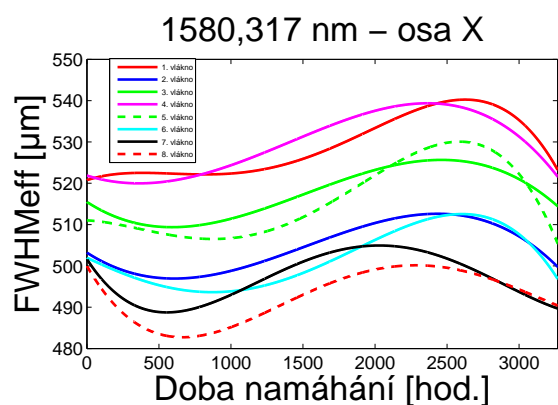
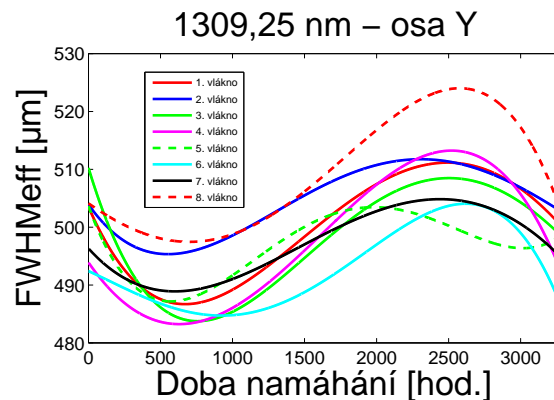
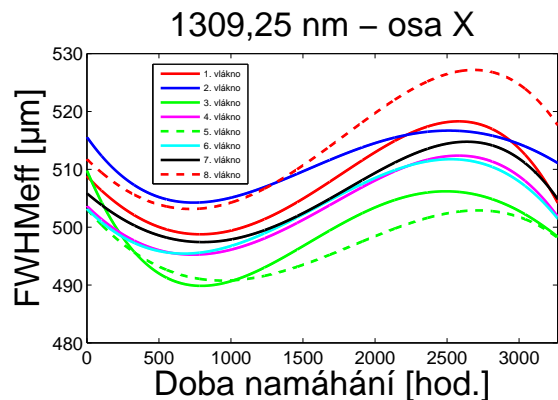
- [13] *How Are Fused Fiber Optic Couplers Made and How Do They Work.* 2015. Dostupné z:<http://www.fs.com/blog/how-are-fused-fiber-optic-couplers-made-how-do-they-work.html>.
- [14] RYŠAVÝ, J. *Aplikace nových technologií v optických přístupových sítích*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 70 s. Vedoucí práce byl Ing. Radim Šifta.
- [15] KŘEPELKA, J. *Měření útlumových parametrů optického coupleru po gama ozáření* bakalářská práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2016. Vedoucí práce byl Ing. Lukáš Bednárek.
- [16] *Optical fiber coupler and PLC splitter structures.* Dostupné z:http://global-sei.com/fttx/product_a/passiveopticalproducts_a/passive-structure.html.
- [17] BLAŽENEC, J. *Spektrální charakteristiky dělicích poměrů vláknově optických děličů.* Diplomová práce. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010. Vedoucí práce byl prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
- [18] GR-20-CORE. *Generic Requirements for Optical Fiber and Optical Fiber Cable.* 4. Piscataway (USA): Ericsson Inc, 2013.
- [19] SHAW, L. B., ABRAMCZYK, J., GOVINDARAJAN, H., CUNNINGHAM, W., GUERTIN, D., TANKALA, K. *Longterm optical reliability and lifetime predictability of double clad fibers.* In: *Fiber Lasers XII: Technology, Systems, and Applications.* 9344. San Francisco: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2015, s. 934415-. DOI: 10.1117/12.2080855.
- [20] LI, J., DANG, J., ZHANG, N., WANG, X. a et al. High and low temperature life experiments of Y waveguide multifunctional integrated optical devices. *Zhongguo Guanzing Jishu Xuebao/Journal of Chinese Inertial Technology.* 2014. 109-113. DOI: 10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2014.01.022. ISSN 10056734.
- [21] PÁPEŠ, M., ŠÍŠKA, P., LÍNER, A. et al. Measurement of attenuation changes of PON elements with temperature. In: *18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics.* 8697. Ostravice: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2012, 86971R. DOI: 10.1117/12.2006394.
- [22] CH'HAYDER, A.: Effect of thermal aging on Rayleigh backscattering in an optical fiber. In: *Optical Engineering.* 2009, 48(4), s. 045001-. DOI: 10.1117/1.3114604. ISSN 0091-3286.
- [23] JONGWOO PARK a D.S. SHIN. Degradation of fiber optical communication devices under damp-heat aging. In: *IEEE Photonics Technology Letters.* 2003, 15(8), s. 1106-1108. DOI: 10.1109/LPT.2003.815336. ISSN 1041-1135.

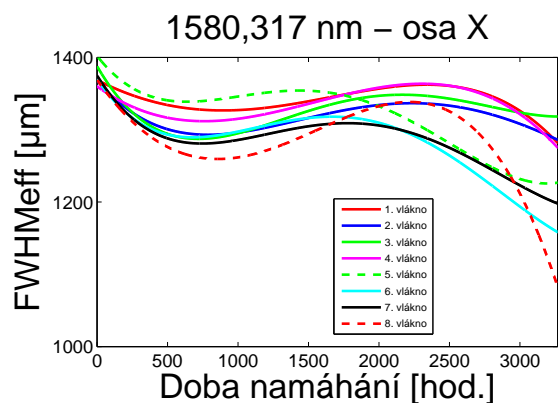
- [24] ROGERS, KIRK, McDUFFEE, FRED T., HOLT, ANNE, MEKKAOU, ABDALLAH. *Improvements in fused optical coupler technology* Proc. SPIE 0574, Fiber Optic Couplers, Connectors, and Splice Technology II, 29 (January 15, 1986); doi:10.1117/12.950696.
- [25] BEDNÁREK, L., HAJEK, L., VANDERKA, A., NEDOMA, J., FAJKUS, M., ZBOŘIL, O., VAŠINEK, V. *The influence of thermal aging on the optical coupler* Proc. SPIE 9958, Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications X, 99580X (7 September 2016); doi: 10.1117/12.2236294.
- [26] MANENKOV, A. A. Fundamental mechanisms of laser-induced damage in optical materials: today's state of understanding and problems. In: *Optical Engineering*. 2014, 53(1), s. 010901-. DOI: 10.1117/1.OE.53.1.010901. ISSN 0091-3286.
- [27] PERCIVAL, R.M., E.S.R. SIKORA a R. WYATT. Catastrophic damage and accelerated ageing in bent fibres caused by high optical powers. In: *Electronics Letters*. 2000, 36(5), s. 414-. DOI: 10.1049/el:20000403. ISSN 00135194.
- [28] WRIGHT, J. V., E. S. R. SIKORA, D. J. MCCARTNEY, K. FARROW, H. G. LIMBERGER a M. John MATTHEWSON. Improved understanding of high-power damage phenomena at fibre bends through analytical temperature mapping. In: *Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks III*. 6193. Strasbourg: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2006, 61930V-61930V-14. DOI: 10.1117/12.662090.
- [29] ZHAO, Xinghai, Jianping HU, Yang GAO, Feng PAN a Ping MA. Laser induced damage and fracture of optical fiber in vacuum chamber. *Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica*. 2010, 59(6), 3917-3923. ISSN 10003290.
- [30] ROBERTSON, A., G. J. EXARHOS, A. H. GUENTHER, N. KAISER, K. L. LEWIS, M. J. SOILEAU a C. J. STOLZ. Laser damage mechanisms in fused fibre components. In: *36th Annual Boulder Damage Symposium Proceedings: Laser-Induced Damage in Optical Materials*. 5647. Boulder: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004, s. 557-558. DOI: 10.1117/12.592017.
- [31] DWIVEDI, A., GLAESEMAN, G. S.: *Optical Fiber Strength, Fatigue and Handleability After Aging in a Cable*. New York: Corning, 2011. Dostupné z: http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/RC-Fiber%20Mechanical%20Reliability/Mechanical_Reliability-Field/TR3290_01-11.pdf.
- [32] KAŠPÁREK, P. *Inteligentní detektor vodíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2013. 52 s., 5 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Boušek, Csc.

- [33] JACOBS, J. *The Impact of Hydrogen on Optical Fibers*. New York – Corning Incorporated, 2004. Dostupné z:http://www.synginc.com/docs/The_Impact_of_Hydrogen_on_Optical_Fibers.pdf
- [34] OPTOKON SFT-S35-01x08-12 CM4-NPC-NPC. *SFT-Sxx-01xN Singlemode Dual Windows and Wavelength Independent couplers*. Dostupné z:http://www.optokon.com/sites/default/files/cpl_08-02_en-sft-s35-01xn.pdf.
- [35] GEZHI WBC-1x8-13/15. Dostupné z:<http://www.imgup.cz/image/LVE7>
- [36] Arrhenius. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 2012 Dostupné z:<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr151.htm>.
- [37] Erbium Doped Fiber IsoGain. *Fibercore - Product*. 2016. Dostupné z:<http://fibercore.com/product/erbium-doped-fiber-isogain>.
- [38] Er110-4/125 Erbium Doped Fiber. *High Performance Lasers*. nLIGHT, Inc, 2016. Dostupné z:<http://www.nlight.net/nlight-files/file/DatasheetsV2/Optical%20Fiber/Er110-4-125.pdf>.
- [39] Boháč, L., Lucki, M. *Optické komunikační systémy*, skriptu ČVUT, 2010, ISBN 978- 80-01-04484-1.
- [40] THORLABS. Thorlabs Beam, Beam Analyzing Software, BP104-UV, -VIS, -IR, -IR2, BP109-UV, -VIS, -IR, -IR2 Operation Manual. 2011. Dostupné na internetu:<https://www.thorlabs.de/thorcat/13500/BP109-IR-Manual.pdf>.
- [41] LITSCHMANNOVÁ, M. Úvod do statistiky. Ostrava, 2011. Dostupné z:http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/uvod_do_statistiky.pdf. Skriptu. VŠB-TU Ostrava.

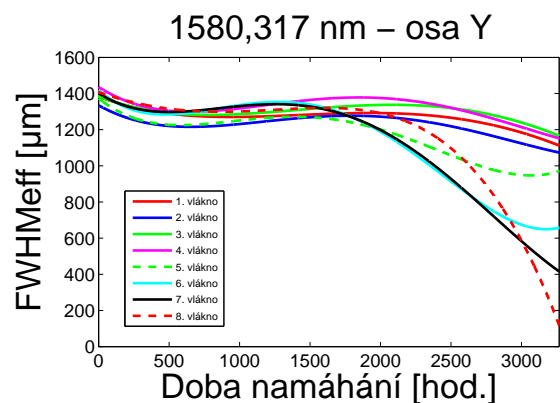
A Grafy naměřených hodnot

A.1 Teplotní zatížení čínského coupleru Gezhi



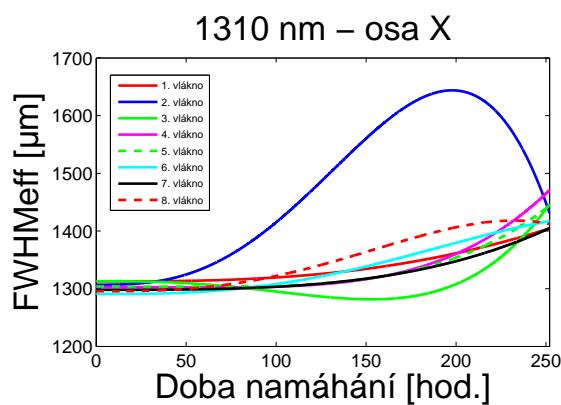


Obrázek 75: Gezhi - FWHM_{eff} - 1 cm

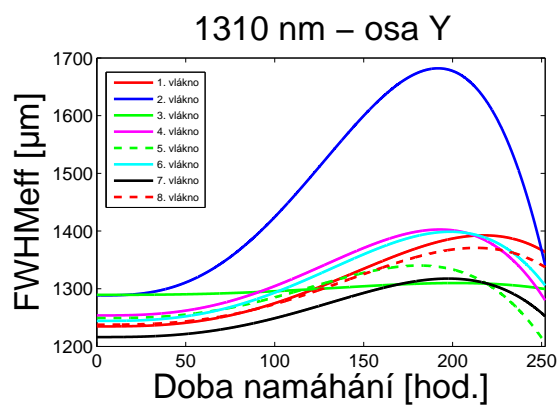


Obrázek 76: Gezhi - FWHM_{eff} - 1 cm

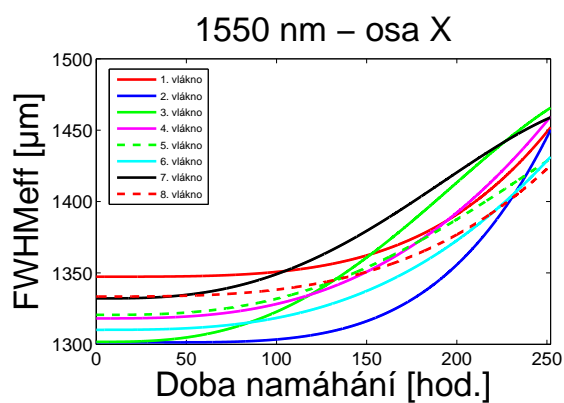
A.2 Měření s nestabilním laserem - výkonové zatížení



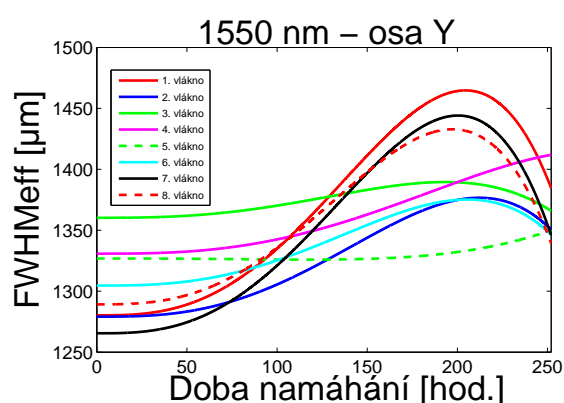
Obrázek 77: Opto - FWHM_{eff} - 0 cm



Obrázek 78: Opto - FWHM_{eff} - 0 cm

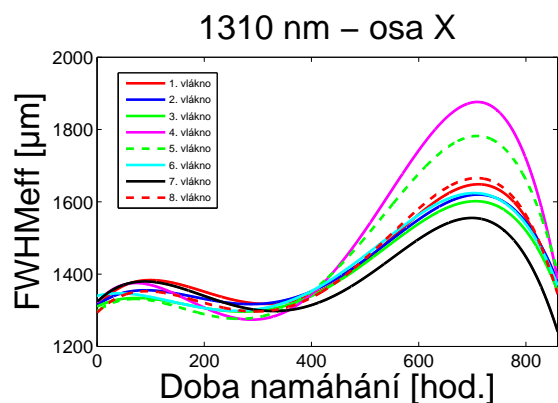


Obrázek 79: Opto - FWHM_{eff} - 0 cm

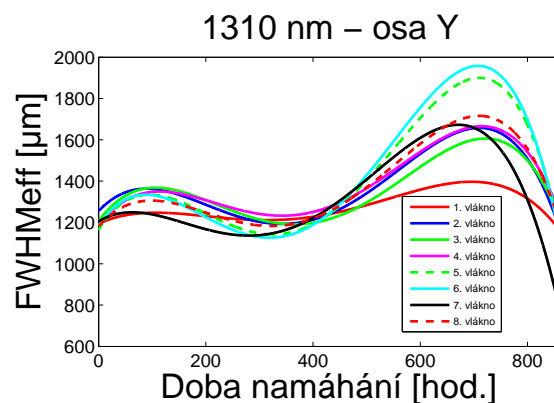


Obrázek 80: Opto - FWHM_{eff} - 0 cm

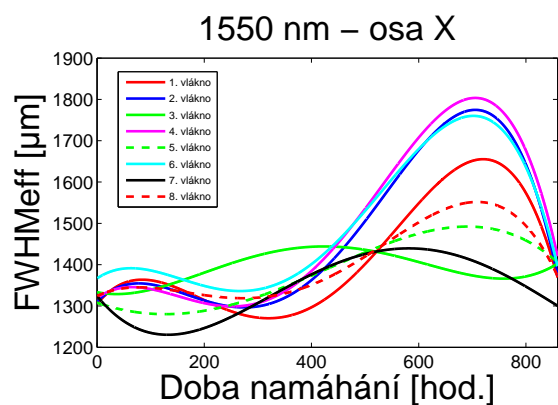
A.3 Měření s nestabilním laserem - tepelné zatížení



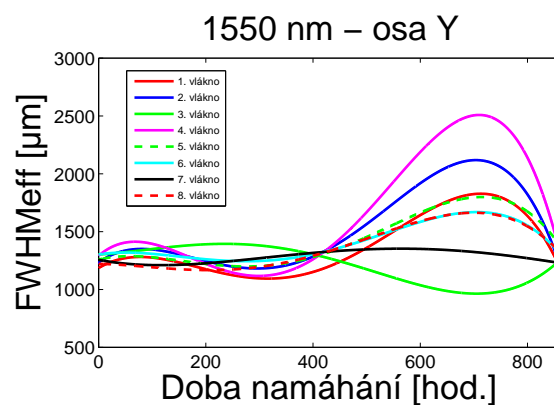
Obrázek 81: Opto - FWHMeff - 0 cm



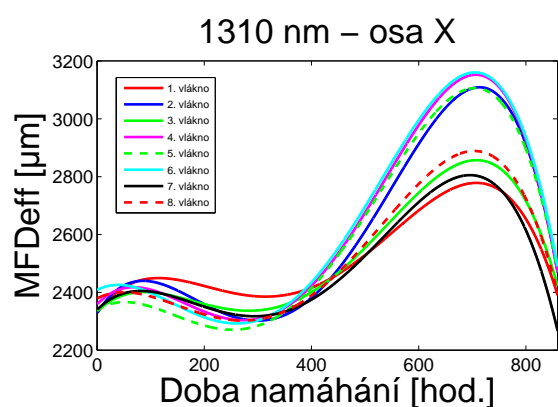
Obrázek 82: Opto - FWHMeff - 0 cm



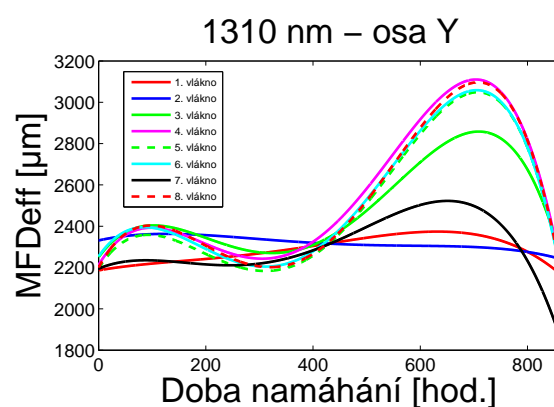
Obrázek 83: Opto - FWHMeff - 0 cm



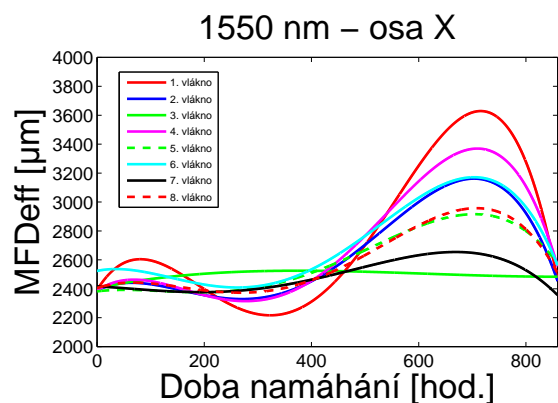
Obrázek 84: Opto - FWHMeff - 0 cm



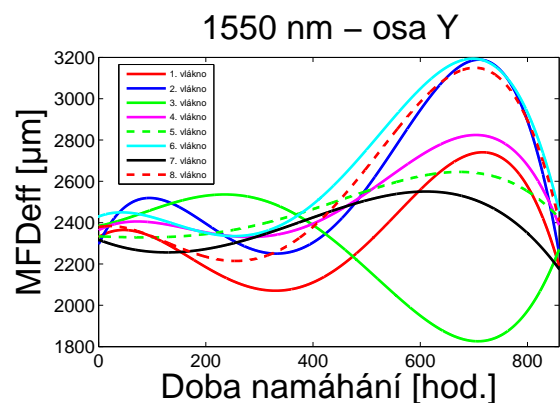
Obrázek 85: Opto - MFDeff - 0 cm



Obrázek 86: Opto - MFDeff - 0 cm

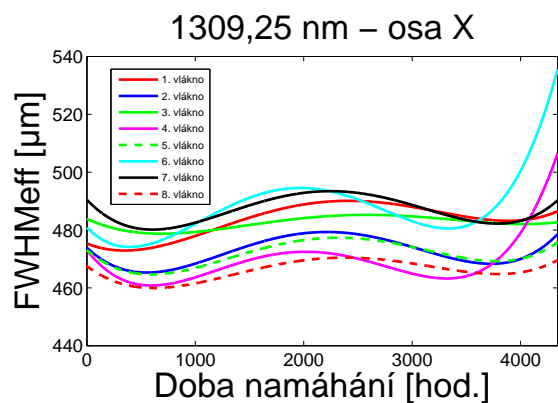


Obrázek 87: Opto - MFDeff - 0 cm

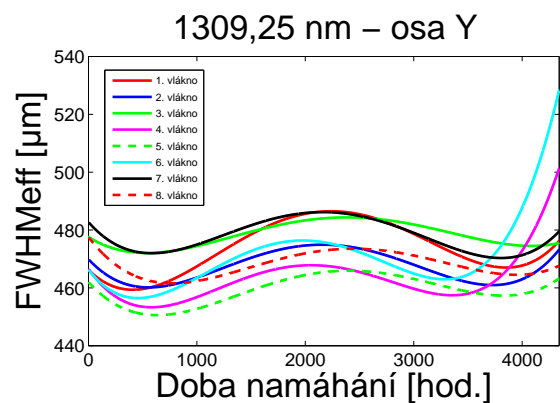


Obrázek 88: Opto - MFDeff - 0 cm

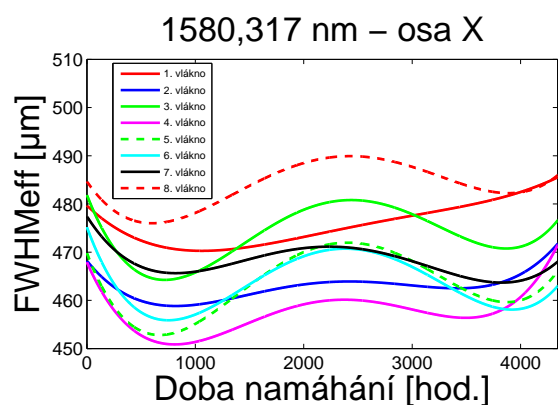
A.4 Zatížení teplem a následně výkonem



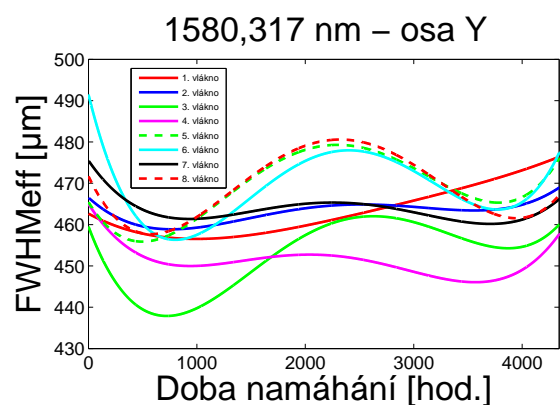
Obrázek 89: Opto - FWHMeff - 0 cm



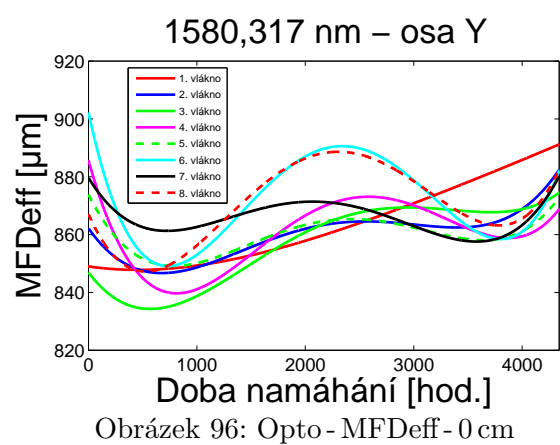
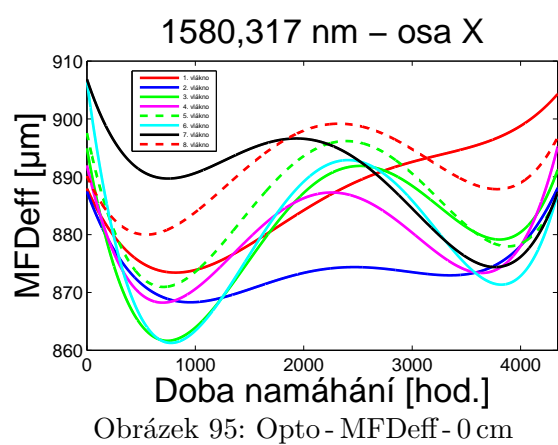
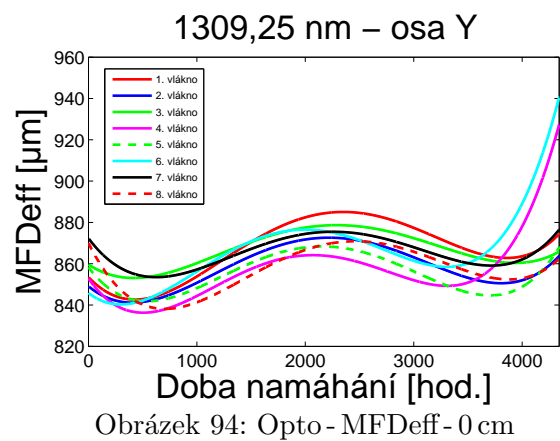
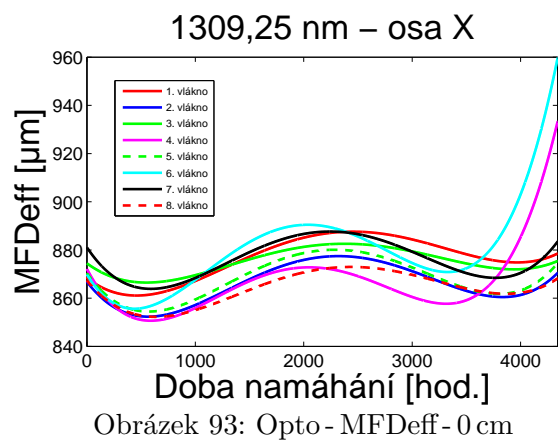
Obrázek 90: Opto - FWHMeff - 0 cm



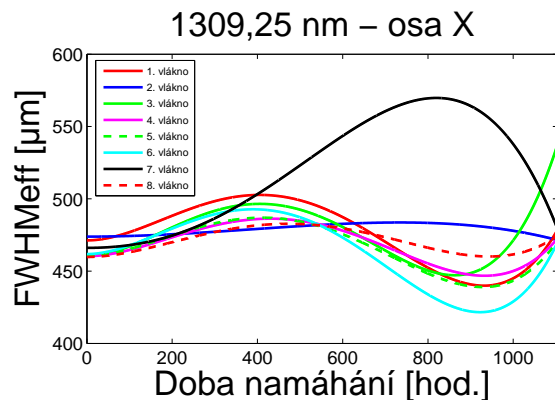
Obrázek 91: Opto - FWHMeff - 0 cm



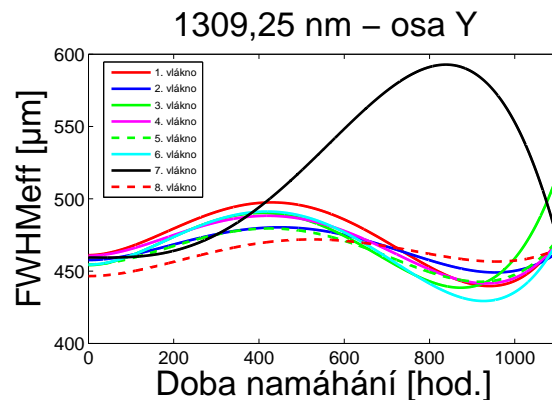
Obrázek 92: Opto - FWHMeff - 0 cm



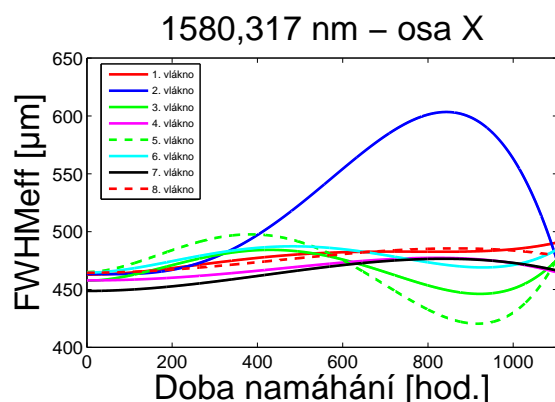
A.5 Zatížení výkonem a následně teplem



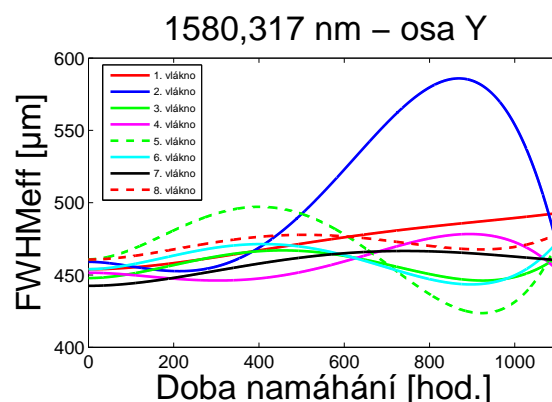
Obrázek 97: Opto - FWHMeff - 0 cm



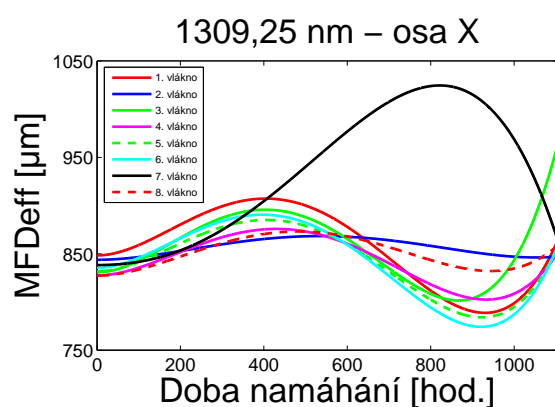
Obrázek 98: Opto - FWHMeff - 0 cm



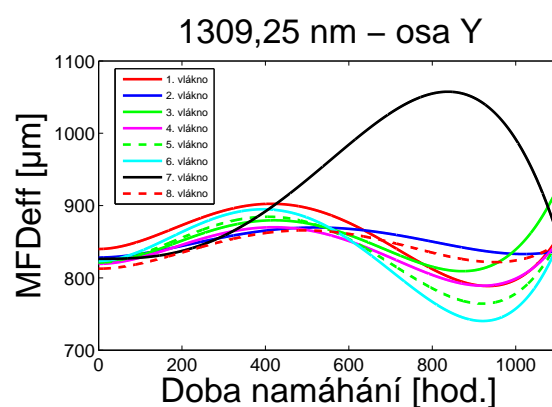
Obrázek 99: Opto - FWHM - 0 cm



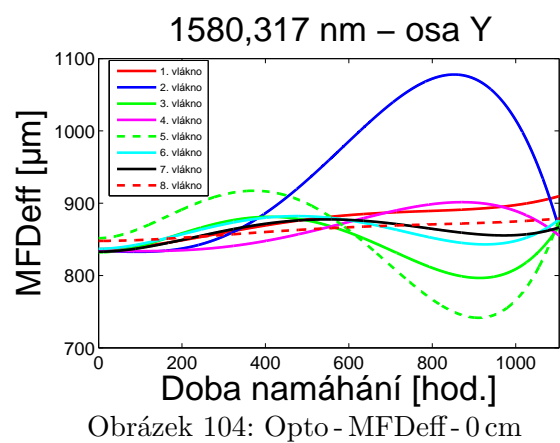
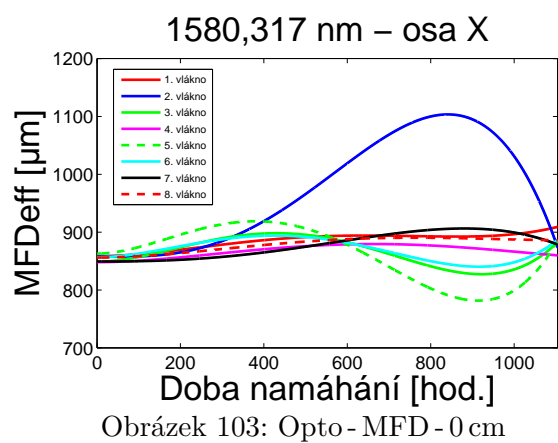
Obrázek 100: Opto - FWHMeff - 0 cm



Obrázek 101: Opto - MFDeff - 0 cm



Obrázek 102: Opto - MFDeff - 0 cm



B Tabulky naměřených hodnot

Tabulka 8: FWHMeff - Gezhi - 0 cm - 1309,25 nm

FWHMeff - Gezhi - 0 cm($\lambda=1309,25$ nm)									
Větev	Osa	Čas zatížení [hod.]							
[-]	[μm]	0	171	507	843	1611	2571	3267	3771
1	x	513,63	496,44	502,56	501,42	504,27	519,28	504,01	515,07
	y	504,30	493,88	488,36	487,39	500,39	511,15	500,57	505,01
2	x	518,90	505,02	505,81	507,27	508,79	517,48	510,89	524,96
	y	508,54	490,72	498,91	498,32	505,05	511,81	502,72	500,08
3	x	514,47	493,23	493,81	493,03	495,82	507,15	498,10	508,94
	y	511,59	497,16	483,20	488,13	495,12	509,11	498,67	484,67
4	x	506,88	494,89	496,26	498,53	500,66	513,20	501,63	511,10
	y	497,04	484,04	482,46	488,68	496,01	514,16	492,92	506,12
5	x	506,89	492,18	495,32	492,71	492,73	503,40	497,99	491,67
	y	504,95	492,68	486,13	491,77	500,08	500,02	498,21	378,65
6	x	505,51	495,72	496,33	497,80	502,24	512,28	501,37	489,02
	y	492,98	488,79	489,04	483,14	490,80	503,85	487,21	363,30
7	x	510,45	495,22	498,87	502,00	500,83	515,89	504,57	490,04
	y	503,68	479,37	493,86	492,90	495,15	506,03	494,73	375,00
8	x	514,80	503,44	503,27	507,18	510,30	527,80	517,42	539,98
	y	506,18	499,92	491,97	505,84	504,84	525,32	503,31	381,68

Tabulka 9: FWHMeff - Gezhi - 0 cm - 1580,317 nm

FWHMeff - Gezhi - 0 cm($\lambda=1580,317$ nm)								
Větev	Osa	Čas zatížení [hod.]						
[-]	[μm]	0	171	507	843	1527	2583	3279
1	x	524,43	516,06	522,91	525,90	523,59	540,98	523,05
	y	521,61	502,87	504,61	498,54	509,10	516,23	484,97
2	x	503,59	499,79	495,80	499,38	503,93	512,56	499,74
	y	488,45	471,97	474,13	465,44	473,24	476,46	457,53
3	x	519,06	506,20	510,78	512,97	515,36	526,18	514,29
	y	498,92	485,14	496,37	485,08	488,02	500,12	487,99
4	x	528,48	509,03	523,23	527,17	527,86	539,87	521,30
	y	524,41	504,70	504,40	511,39	504,67	517,82	490,38
5	x	513,90	504,66	511,55	506,16	511,34	530,36	505,40
	y	500,51	488,92	483,82	485,65	486,91	474,12	451,19
6	x	505,31	493,77	495,98	496,76	496,34	513,23	496,69
	y	518,09	503,75	503,30	498,76	496,41	499,70	472,79
7	x	505,42	487,72	490,72	493,09	499,24	501,49	489,52
	y	512,88	496,86	502,64	491,14	500,36	489,71	451,31
8	x	503,77	485,28	483,80	487,40	490,67	499,93	490,20
	y	504,34	499,46	488,72	504,13	493,36	479,30	421,44

Tabulka 10: FWHMeff - Gezhi - 1 cm - 1309,25 nm

FWHMeff - Gezhi - 1 cm($\lambda=1309,25$ nm)									
Větev	Osa	Čas zatížení [hod.]							
[-]	[μm]	0	171	507	843	1611	2571	3267	3771
1	x	1401,08	1310,58	1313,52	1312,16	1400,18	1416,32	1349,13	1314,36
	y	1460,07	1364,13	1384,23	1370,28	1474,46	1481,38	1429,85	1178,72
2	x	1402,90	1357,47	1353,55	1357,22	1444,04	1439,28	1392,26	1367,85
	y	1481,34	1379,23	1385,36	1387,82	1470,22	1477,67	1431,50	1212,54
3	x	1397,50	1305,12	1299,96	1295,46	1373,03	1384,00	1321,96	1259,57
	y	1472,60	1384,45	1362,18	1368,30	1455,50	1468,98	1409,52	1145,83
4	x	1379,26	1321,23	1309,06	1312,28	1383,03	1397,34	1346,10	1289,27
	y	1444,80	1372,86	1376,32	1371,23	1448,60	1465,94	1395,40	1146,62
5	x	1388,92	1311,54	1306,28	1302,95	1379,83	1386,17	1334,22	832,53
	y	1464,56	1370,52	1362,48	1385,13	1489,62	1463,48	1424,00	19,41
6	x	1389,13	1325,50	1323,98	1313,99	1401,34	1403,98	1359,83	948,77
	y	1421,75	1386,61	1361,10	1354,65	1442,23	1435,94	1373,67	19,21
7	x	1404,91	1321,51	1321,98	1323,01	1403,00	1423,97	1359,68	693,88
	y	1451,88	1348,50	1365,26	1360,62	1436,01	1448,33	1392,49	35,88
8	x	1428,61	1366,86	1356,14	1366,31	1449,90	1468,77	1404,16	844,27
	y	1477,95	1407,13	1370,11	1388,47	1498,29	1492,50	1435,46	18,79

Tabulka 11: FWHMeff - Gezhi - 1 cm - 1580,317 nm

FWHMeff - Gezhi - 1 cm($\lambda=1580,317$ nm)								
Větev	Osa	Čas zatížení [hod.]						
[-]	[μ m]	0	171	507	843	1527	2583	3279
1	x	1380,266	1335,296	1333,540	1340,290	1331,330	1361,360	1281,180
	y	1414,850	1287,800	1293,455	1302,060	1263,358	1265,160	1110,786
2	x	1386,476	1304,260	1305,950	1308,564	1305,828	1334,836	1285,112
	y	1346,846	1252,097	1231,765	1222,420	1265,450	1208,674	1073,230
3	x	1400,264	1320,192	1294,838	1302,010	1318,300	1343,324	1317,450
	y	1400,480	1312,922	1305,620	1285,214	1310,470	1314,504	1165,540
4	x	1383,348	1299,350	1325,356	1329,800	1323,080	1362,908	1274,163
	y	1448,582	1356,990	1268,646	1356,633	1342,850	1315,064	1150,813
5	x	1418,040	1340,028	1349,996	1350,070	1345,876	1275,862	1225,976
	y	1388,992	1255,060	1258,142	1224,463	1269,036	1037,632	970,218
6	x	1381,876	1312,526	1290,808	1306,918	1307,500	1258,028	1157,653
	y	1443,992	1283,196	1310,956	1318,420	1329,000	875,350	656,640
7	x	1391,300	1304,768	1287,270	1300,724	1293,208	1272,237	1196,922
	y	1436,668	1272,426	1331,400	1322,700	1313,940	885,707	414,944
8	x	1384,960	1303,404	1269,744	1283,470	1281,884	1321,525	1081,990
	y	1422,942	1344,730	1306,468	1325,513	1305,342	1052,573	117,210

Tabulka 12: MFDeff - Gezhi - 0 cm - 1309,25 nm

MFDeff - Gezhi - 0 cm($\lambda=1309,25$ nm)									
Větev	Osa	Čas zatížení [hod.]							
[-]	[μ m]	0	171	507	843	1611	2571	3267	3771
1	x	917,15	888,62	898,77	897,94	902,03	923,32	903,38	929,82
	y	909,21	885,96	890,39	881,92	895,98	913,70	894,65	883,55
2	x	918,722	894,502	894,592	899,898	902,192	918,486	903,452	918,98
	y	908,11	882,43	890,33	888,55	895,88	909,23	892,48	882,14
3	x	916,620	885,768	891,645	888,474	896,188	916,848	897,870	915,13
	y	909,18	884,85	882,99	881,61	889,46	912,78	891,15	878,02
4	x	908,92	886,12	890,14	890,65	899,84	919,62	901,07	917,70
	y	903,59	884,95	882,92	880,74	893,66	916,98	892,50	892,88
5	x	910,58	886,95	889,63	889,76	893,93	913,85	896,26	854,63
	y	898,92	883,61	877,82	885,45	893,56	893,73	892,39	758,04
6	x	909,05	889,54	892,91	894,87	902,44	922,32	901,84	886,63
	y	897,31	884,58	882,48	882,93	895,14	916,20	892,67	732,35
7	x	915,188	887,668	892,056	898,044	899,866	921,116	901,99	863,02
	y	901,42	870,75	882,71	885,66	895,64	911,81	895,02	730,96
8	x	914,386	896,324	893,956	903,010	908,572	939,392	922,65	937,75
	y	903,94	885,19	886,68	889,80	903,87	921,48	903,05	738,71

Tabulka 13: MFDeff - Gezhi - 0 cm - 1580,317 nm

MFDeff - Gezhi - 0 cm ($\lambda=1580,317$ nm)								
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]						
[-]	[μ m]	0	171	507	843	1527	2583	3279
1	x	947,66	920,58	932,11	939,74	936,32	969,51	935,40
	y	936,24	915,52	900,51	909,73	917,02	935,79	897,21
2	x	937,98	926,31	926,08	933,12	941,54	959,31	933,89
	y	926,46	900,90	903,70	897,31	916,12	905,50	873,75
3	x	940,29	923,81	930,11	934,76	932,62	955,26	939,41
	y	917,25	911,06	914,73	910,06	918,20	925,47	898,23
4	x	951,16	921,34	935,38	940,39	945,08	960,29	929,40
	y	947,20	905,47	913,97	942,84	919,05	938,23	894,35
5	x	936,76	921,12	925,94	922,02	927,39	946,41	919,45
	y	933,70	907,08	895,70	897,38	913,85	914,07	836,72
6	x	946,98	928,15	926,23	927,29	935,44	955,68	915,97
	y	923,65	904,37	902,11	903,17	917,13	892,59	834,89
7	x	949,01	922,17	922,44	927,27	932,27	929,84	907,15
	y	924,15	894,33	903,19	891,93	916,02	875,07	833,35
8	x	946,44	923,40	920,81	928,10	932,59	950,85	913,55
	y	932,68	909,51	906,14	921,85	904,70	881,52	800,51

Tabulka 14: MFDeff - Gezhi - 1 cm - 1309,25 nm

MFDeff - Gezhi - 1 cm ($\lambda=1309,25$ nm)									
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]							
[-]	[μ m]	0	171	507	843	1611	2571	3267	3771
1	x	2476,01	2340,99	2340,09	2336,32	2485,08	2500,37	2394,42	2340,27
	y	2638,45	2450,25	2437,35	2458,90	2624,56	2610,70	2543,00	2282,96
2	x	2479,24	2351,73	2353,20	2364,64	2501,90	2506,25	2421,54	2306,12
	y	2614,88	2466,10	2446,42	2444,32	2631,07	2597,75	2536,78	2243,38
3	x	2477,66	2331,10	2326,10	2309,83	2471,18	2473,08	2390,63	2306,61
	y	2587,29	2433,13	2432,44	2430,41	2610,80	2570,23	2512,82	2209,53
4	x	2461,83	2340,59	2335,71	2337,60	2471,17	2491,75	2397,68	2282,42
	y	2612,11	2449,49	2422,26	2440,20	2625,21	2635,95	2495,38	2229,56
5	x	2467,35	2343,21	2335,70	2334,39	2467,25	2476,11	2393,35	1799,36
	y	2600,15	2435,39	2427,67	2464,08	2636,23	2591,93	2509,91	921,18
6	x	2455,64	2336,18	2337,36	2337,11	2487,04	2493,70	2391,25	1821,93
	y	2589,24	2440,88	2408,41	2438,44	2626,79	2592,33	2498,37	787,44
7	x	2491,85	2340,26	2346,01	2343,54	2475,68	2492,46	2401,03	1810,96
	y	2589,64	2405,75	2419,84	2435,92	2592,95	2582,43	2487,85	581,02
8	x	2496,19	2383,13	2361,69	2375,56	2527,51	2561,62	2470,44	1947,60
	y	2604,63	2455,81	2443,45	2471,83	2637,88	2647,75	2515,06	1143,85

Tabulka 15: MFDeff - Gezhi - 1 cm - 1580,317 nm

MFDeff - Gezhi - 1 cm($\lambda=1580,317$ nm)								
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]						
[-]	[μm]	0	171	507	843	1527	2583	3279
1	x	2473,70	2381,61	2371,42	2340,18	2362,19	2478,61	2340,69
	y	2590,11	2368,32	2327,88	2341,43	2410,11	2345,46	2224,39
2	x	2514,16	2366,15	2411,05	2385,47	2328,99	2437,98	2310,31
	y	2526,60	2267,00	2367,48	2289,89	2378,33	2291,55	2138,18
3	x	2509,73	2370,64	2371,58	2375,72	2394,02	2464,16	2386,52
	y	2570,96	2457,13	2378,82	2396,19	2441,37	2373,93	2136,30
4	x	2504,00	2364,77	2361,62	2395,57	2382,32	2463,59	2340,59
	y	2567,41	2417,34	2383,79	2450,15	2415,60	2438,77	2271,66
5	x	2514,18	2404,62	2383,67	2376,45	2377,84	2343,71	2224,30
	y	2564,78	2347,59	2366,12	2299,22	2380,24	2143,72	2044,42
6	x	2504,92	2390,48	2346,71	2372,62	2388,87	2354,79	2221,24
	y	2546,82	2376,94	2373,76	2400,40	2367,79	2070,02	1803,03
7	x	2507,08	2367,13	2371,57	2392,27	2351,22	2376,05	2196,10
	y	2512,80	2336,26	2336,28	2338,63	2347,90	2085,38	1635,56
8	x	2523,81	2378,01	2358,06	2395,90	2364,83	2384,27	2062,46
	y	2553,28	2369,85	2343,46	2426,09	2367,92	2216,63	1476,90

Tabulka 16: Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení - FWHMeff - 1309,25 nm - 0 cm

FWHMeff - Optokon - 0 cm($\lambda=1309,25$ nm)										
Větev	Osa	Čas zatížení [hod.]								
[-]	[μm]	0	195	531	867	1611	2571	3267	3771	4341
1	x	477,86	467,75	476,78	477,87	481,48	495,53	479,69	487,02	485,81
	y	469,81	453,17	466,07	463,44	478,24	489,77	466,48	472,12	475,20
2	x	475,51	466,03	465,48	468,11	474,72	481,40	464,84	473,25	477,40
	y	476,85	451,83	464,19	463,83	470,94	474,81	458,34	466,75	471,63
3	x	485,30	476,18	485,27	477,58	477,66	493,51	474,53	487,46	481,88
	y	478,35	468,42	483,19	468,11	475,35	494,83	467,89	481,59	474,66
4	x	474,75	461,59	463,12	464,64	466,49	472,53	462,56	468,35	506,83
	y	466,76	457,50	455,92	452,92	465,68	465,49	456,26	463,87	501,13
5	x	476,86	461,97	466,39	466,28	474,15	477,61	467,20	473,90	474,49
	y	460,88	459,93	445,41	452,34	463,08	465,81	455,35	462,83	461,77
6	x	481,95	469,92	483,55	476,92	488,11	493,60	481,01	485,24	536,50
	y	462,49	461,85	465,98	451,46	473,78	474,94	461,70	471,49	529,12
7	x	493,53	481,15	476,99	485,04	490,04	493,44	479,82	488,10	488,60
	y	461,37	494,52	451,46	464,10	456,00	478,55	447,57	466,15	465,63
8	x	467,91	462,24	459,94	462,36	464,29	474,20	461,95	467,64	469,08
	y	477,25	470,10	461,88	464,08	464,85	478,40	463,41	467,84	467,14

Tabulka 17: Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení - FWHMeff - 1580,317 nm - 0 cm

FWHMeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1580,317$ nm)										
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]								
[-]	[μm]	0	195	531	867	1611	2571	3267	3771	4341
1	x	484,65	471,25	470,04	467,36	480,57	472,16	469,34	493,19	481,86
	y	467,73	456,37	451,26	458,74	463,88	462,33	454,77	485,60	472,33
2	x	474,10	455,48	457,75	464,11	461,26	463,24	459,16	467,86	470,33
	y	467,06	463,59	450,19	473,44	451,05	473,67	455,73	467,35	468,47
3	x	486,89	464,39	467,90	465,06	473,33	482,57	467,61	477,93	474,72
	y	462,30	444,31	440,06	438,05	449,78	464,50	450,01	461,86	458,10
4	x	473,84	450,41	450,26	460,63	449,90	462,68	453,65	459,76	470,86
	y	469,42	450,62	454,88	451,29	449,74	456,86	435,41	455,71	455,52
5	x	477,30	448,98	454,11	457,87	463,53	471,23	460,53	465,18	464,45
	y	477,90	438,92	458,15	467,42	469,31	478,68	464,19	471,94	473,95
6	x	482,73	453,73	456,46	463,73	460,45	472,60	457,56	464,25	461,38
	y	500,43	463,39	452,06	468,81	463,95	482,36	453,60	477,66	473,71
7	x	462,13	500,74	455,65	457,40	474,75	473,32	458,53	469,17	466,93
	y	461,37	494,52	451,44	464,18	456,00	478,55	447,57	466,15	465,63
8	x	486,44	476,69	476,56	478,39	482,55	492,88	479,76	486,90	484,90
	y	466,90	471,89	453,03	462,13	468,47	484,29	466,23	463,18	467,25

Tabulka 18: Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení - FWHMeff - 1309,25 nm - 1 cm

FWHMeff - Optokon - 1 cm ($\lambda=1309,25$ nm)												
Větřev [-]	Osa [μm]	Čas zatížení [hod.]										
		0	195	531	867	1611	2571	3267	3771	4341		
1	x	1338,60	1277,12	1277,38	1284,08	1359,15	1376,58	1324,54	1349,13	1370,96		
	y	1353,29	1307,28	1286,81	1287,65	1400,98	1420,50	1334,02	1362,93	1396,04		
2	x	1330,35	1273,31	1256,45	1262,53	1346,45	1342,09	1285,47	1317,94	1349,30		
	y	1401,44	1317,03	1318,93	1325,12	1397,81	1416,69	1338,52	1367,04	1384,97		
3	x	1356,49	1291,72	1285,99	1279,28	1367,62	1372,25	1315,14	1360,02	1367,50		
	y	1400,33	1340,40	1271,66	1322,44	1428,36	1432,13	1364,67	1405,27	1428,57		
4	x	1326,50	1262,31	1258,62	1259,53	1340,81	1333,12	1279,77	1317,50	1366,82		
	y	1373,76	1318,74	1297,20	1311,62	1416,97	1383,60	1320,53	1366,35	1427,16		
5	x	1324,32	1262,86	1257,20	1249,71	1343,38	1342,61	1289,70	1334,79	1347,37		
	y	1357,60	1325,46	1262,96	1289,27	1357,32	1369,06	1348,66	1337,32	1351,35		
6	x	1357,20	1269,31	1290,26	1270,60	1361,68	1374,75	1312,11	1365,71	1422,18		
	y	1371,50	1314,36	1302,75	1289,28	1396,43	1380,85	1349,62	1369,62	1461,13		
7	x	1363,35	1299,71	1277,78	1277,23	1371,36	1361,93	1308,38	1351,01	1360,56		
	y	1430,77	1367,83	1322,75	1331,16	1418,44	1430,35	1350,04	1387,17	1416,23		
8	x	1294,33	1247,97	1228,70	1227,68	1310,95	1315,54	1272,10	1289,53	1313,85		
	y	1398,92	1339,05	1308,61	1304,19	1385,60	1410,10	1354,66	1373,36	1390,40		

Tabulka 19: Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení - FWHMeff - 1580,317 nm - 1 cm

FWHMeff - Optokon - 1 cm ($\lambda=1580,317$ nm)												
Větřev	Osa	Čas zatížení [hod.]										
		[-]	0	195	531	867	1515	2571	3267	3771	4341	
1	x		1310,07	1241,91	1244,73	1251,30	1241,09	1330,34	1269,40	1284,66	1355,14	
	y		1222,44	1207,90	1206,32	1241,66	1205,57	1313,22	1170,27	1272,78	1389,80	
2	x		1296,76	1213,08	1229,99	1211,27	1202,24	1287,45	1223,47	1262,53	1314,81	
	y		1223,61	1204,98	1189,56	1232,23	1201,11	1361,96	1151,92	1255,06	1404,59	
3	x		1338,00	1251,96	1252,57	1264,68	1246,71	1334,75	1254,06	1289,86	1335,38	
	y		1162,19	1187,38	1189,00	1202,14	1180,18	1345,19	1117,91	1250,86	1381,47	
4	x		1270,16	1178,61	1175,90	1201,31	1153,63	1257,59	1201,69	1228,70	1305,86	
	y		1287,01	1189,24	1178,81	1237,44	1167,82	1311,85	1147,25	1200,16	1377,43	
5	x		1266,46	1186,22	1185,00	1202,73	1198,73	1266,95	1217,69	1290,21	1300,12	
	y		1319,25	1198,04	1239,98	1264,37	1199,77	1360,03	1161,15	1333,93	1433,75	
6	x		1273,88	1191,36	1181,78	1204,89	1189,90	1281,98	1221,30	1274,19	1321,87	
	y		1345,68	1224,56	1190,47	1212,17	1150,88	1341,15	1121,10	1317,10	1440,04	
7	x		1255,92	1237,68	1194,22	1193,90	1217,28	1288,11	1198,87	1261,14	1289,91	
	y		1245,52	1212,86	1195,71	1253,92	1186,46	1347,72	1097,97	1291,70	1413,98	
8	x		1370,08	1304,33	1303,00	1292,47	1298,08	1387,03	1289,76	1359,04	1394,95	
	y		1326,32	1242,30	1227,04	1230,37	1199,65	1378,80	1169,92	1318,82	1411,89	

Tabulka 20: Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení - MFDeff - 1309,25 nm - 0 cm

MFDeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1309,25$ nm)										
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]								
[-]	[μ m]	0	195	531	867	1611	2571	3267	3771	4341
1	x	873,82	852,78	865,25	869,40	872,32	896,53	870,07	882,38	877,16
	y	860,25	834,12	846,10	853,85	869,01	894,34	853,26	876,75	871,19
2	x	872,23	848,35	856,45	855,63	868,55	881,54	855,84	869,33	868,33
	y	852,02	838,34	843,07	848,49	864,35	876,89	844,73	860,44	861,47
3	x	875,97	860,59	882,20	862,12	869,19	896,42	863,55	877,84	874,94
	y	858,83	849,41	868,85	850,94	863,10	894,00	853,15	866,74	865,49
4	x	876,53	851,10	852,15	858,94	863,80	871,24	856,45	868,25	933,30
	y	857,42	834,21	838,13	843,08	859,30	859,65	847,27	862,85	926,61
5	x	877,36	849,37	857,07	859,19	872,97	880,82	859,35	869,97	872,32
	y	860,92	845,40	840,11	845,23	866,34	864,74	842,80	852,92	865,61
6	x	871,24	852,08	867,71	859,99	879,65	890,63	869,81	880,46	960,70
	y	844,98	839,26	850,81	845,67	872,44	872,26	858,11	869,35	941,09
7	x	885,53	866,42	858,68	871,56	881,94	888,30	862,95	879,25	880,59
	y	872,97	863,648	846,63	859,62	869,08	879,26	849,38	871,11	873,57
8	x	869,60	854,91	852,42	857,49	860,91	878,67	859,16	866,68	867,24
	y	869,52	852,44	843,41	837,70	854,55	875,66	856,36	854,40	862,37

Tabulka 21: Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení - MFDeff - 1580,317 nm - 0 cm

MFDeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1580,317$ nm)										
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]								
[-]	[μ m]	0	195	531	867	1515	2571	3267	3771	4341
1	x	897,74	870,48	872,97	867,66	894,09	885,94	873,33	920,96	897,23
	y	852,94	844,46	843,53	852,57	852,47	874,35	850,78	902,23	886,30
2	x	897,80	865,62	866,21	876,91	872,82	872,04	866,07	884,23	885,06
	y	864,83	850,75	839,95	861,92	845,42	872,60	855,18	868,07	881,90
3	x	904,55	863,24	866,39	863,71	878,64	893,80	871,01	892,86	887,39
	y	841,19	841,95	846,69	831,36	838,99	882,17	862,20	865,80	876,13
4	x	903,28	861,13	867,01	885,86	868,97	893,79	865,26	881,92	893,24
	y	891,12	856,41	841,60	846,68	848,90	884,32	843,60	876,49	864,73
5	x	911,28	862,69	872,04	881,06	884,39	894,27	879,21	887,03	884,04
	y	892,74	826,76	857,07	874,87	833,77	881,31	845,98	865,20	871,75
6	x	922,05	861,06	863,06	874,18	874,48	895,71	864,54	886,71	882,86
	y	921,79	843,95	847,01	880,05	853,43	902,03	851,48	872,07	878,90
7	x	880,91	948,00	872,00	872,50	909,38	895,09	864,39	886,77	884,44
	y	842,86	935,33	836,94	857,66	860,21	893,01	834,45	868,52	879,72
8	x	892,69	878,60	882,33	884,98	886,43	909,21	875,45	898,73	894,56
	y	870,89	848,08	845,39	861,98	864,93	898,16	856,76	872,52	880,64

Tabulka 22: Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení - MFDeff - 1309,25 nm - 1 cm

MFDeff - Optokon - 1 cm ($\lambda=1309,25$ nm)												
Větřev [-]	Osa [μm]	Čas zatížení [hod.]										
		0	195	531	867	1611	2571	3267	3771	4341		
1	x	2410,41	2296,31	2293,92	2288,79	2440,99	2458,01	2364,35	2421,94	2438,97		
	y	2450,60	2385,01	2360,10	2347,93	2530,21	2577,69	2476,05	2542,93	2519,44		
2	x	2407,74	2306,06	2263,57	2290,50	2439,85	2429,99	2330,46	2392,54	2427,87		
	y	2489,59	2394,38	2340,69	2380,77	2545,30	2568,27	2443,42	2480,70	2520,68		
3	x	2416,46	2307,24	2299,93	2315,62	2456,90	2455,84	2360,37	2424,49	2444,61		
	y	2480,52	2353,27	2319,63	2396,03	2567,87	2622,30	2478,52	2546,60	2516,73		
4	x	2406,46	2296,70	2279,37	2297,04	2436,63	2428,14	2337,15	2401,09	2468,68		
	y	2473,81	2334,34	2358,88	2370,29	2581,53	2523,87	2397,20	2486,65	2634,69		
5	x	2401,66	2279,71	2294,82	2270,30	2436,83	2422,03	2357,49	2424,65	2415,70		
	y	2471,21	2374,56	2375,33	2372,15	2549,13	2502,69	2432,09	2509,35	2529,85		
6	x	2402,01	2286,19	2295,19	2291,10	2440,56	2439,59	2351,79	2410,25	2505,88		
	y	2445,26	2369,91	2363,59	2349,29	2518,51	2525,16	2499,55	2510,59	2609,29		
7	x	2430,16	2299,05	2292,72	2278,43	2433,88	2436,49	2353,79	2400,55	2444,87		
	y	2542,07	2417,21	2392,88	2353,42	2542,87	2591,00	2469,23	2527,29	2584,18		
8	x	2393,86	2286,48	2272,81	2282,00	2417,67	2422,58	2347,28	2390,87	2420,72		
	y	2533,18	2373,63	2359,71	2370,31	2509,78	2531,79	2463,80	2466,01	2525,06		

Tabulka 23: Měření po tepelném a následně výkonovém zatížení- MFDeff - 1580,317 nm - 1 cm

MFDeff - Optokon - 1 cm ($\lambda=1580,317$ nm)												
Větřev [-]	Osa [μm]	Čas zatížení [hod.]										
		0	195	531	867	1515	2571	3267	3771	4341		
1	x	2374,39	2264,77	2308,94	2271,04	2280,35	2431,71	2274,52	2351,08	2484,08		
	y	2349,98	2208,79	2256,85	2256,41	2203,97	2436,49	2088,27	2273,44	2602,74		
2	x	2367,48	2255,43	2257,54	2268,98	2248,40	2382,71	2280,39	2358,81	2454,28		
	y	2349,95	2223,14	2230,43	2244,72	2218,02	2452,51	2190,29	2350,34	2628,00		
3	x	2412,62	2280,48	2273,24	2281,62	2264,12	2417,84	2278,00	2354,70	2476,62		
	y	2191,07	2228,47	2210,73	2282,69	2261,79	2456,10	2146,87	2374,38	2594,98		
4	x	2414,50	2260,78	2304,72	2286,92	2243,29	2409,50	2309,93	2349,00	2479,20		
	y	2359,86	2272,33	2238,50	2283,36	2133,34	2461,98	2168,92	2338,17	2598,57		
5	x	2404,95	2238,61	2215,36	2278,99	2255,34	2406,60	2272,24	2375,67	2441,69		
	y	2429,36	2190,85	2244,04	2338,06	2248,97	2486,17	2156,97	2381,66	2585,19		
6	x	2422,20	2237,28	2276,93	2260,99	2237,27	2419,56	2255,73	2367,90	2467,90		
	y	2443,27	2210,02	2251,37	2264,48	2208,79	2465,04	2115,41	2359,57	2540,40		
7	x	2391,44	2320,04	2292,52	2272,03	2302,43	2418,72	2317,45	2396,08	2447,85		
	y	2343,68	2329,40	2233,21	2336,27	2191,17	2478,58	2152,98	2418,02	2577,83		
8	x	2428,19	2323,95	2344,68	2334,67	2301,08	2467,78	2329,87	2458,30	2497,52		
	y	2400,28	2280,40	2273,58	2263,44	2217,95	2542,05	2271,32	2427,40	2602,08		

Tabulka 24: Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení - FWHMeff - 1309,25 nm - 0 cm

FWHMeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1309,25$ nm)					
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]			
[-]	[μm]	0	248	573	1104
1	x	471,25	493,60	491,17	478,60
	y	461,05	485,39	489,04	472,70
2	x	473,85	476,26	482,32	471,45
	y	457,65	472,03	476,71	463,74
3	x	460,57	486,30	484,38	537,57
	y	454,12	479,82	478,20	519,92
4	x	460,32	477,65	480,32	472,58
	y	460,59	479,51	480,60	471,25
5	x	460,59	479,02	478,44	470,91
	y	454,63	471,44	473,34	473,11
6	x	461,80	484,76	477,72	470,02
	y	454,47	479,77	480,66	472,55
7	x	466,08	479,66	538,11	479,08
	y	459,40	468,40	540,51	467,76
8	x	459,79	473,52	480,73	474,42
	y	446,55	460,00	471,50	465,84

Tabulka 25: Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení - FWHMeff - 1580,317 nm - 0 cm

FWHMeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1580,317$ nm)					
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]			
[-]	[μm]	0	248	573	1104
1	x	462,78	470,64	481,82	490,66
	y	453,93	460,11	474,90	492,90
2	x	463,37	471,12	545,84	473,52
	y	459,11	453,12	514,15	464,73
3	x	457,57	475,36	478,23	476,25
	y	447,88	459,87	464,48	463,31
4	x	457,81	461,33	472,37	464,64
	y	451,59	446,58	457,22	452,18
5	x	465,07	489,59	480,37	477,75
	y	460,82	487,01	482,71	475,14
6	x	464,59	477,88	485,83	484,84
	y	454,06	466,33	465,59	474,16
7	x	448,70	454,55	469,91	466,25
	y	442,51	450,31	464,37	460,24
8	x	464,46	468,48	479,70	479,27
	y	460,69	470,20	477,23	478,92

Tabulka 26: Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení - FWHMeff - 1309,25 nm - 1 cm

FWHMeff - Optokon - 1 cm($\lambda=1309,25$ nm)					
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]			
[-]	[μm]	0	248	573	1104
1	x	1259,07	1370,48	1344,23	1335,87
	y	1332,53	1438,22	1429,75	1424,26
2	x	1276,65	1381,67	1339,12	1339,81
	y	1327,08	1443,12	1413,23	1410,09
3	x	1255,23	1337,32	1339,53	1409,65
	y	1347,09	1436,76	1431,34	1374,46
4	x	1266,58	1357,84	1351,12	1339,13
	y	1332,16	1406,48	1419,89	1416,81
5	x	1251,31	1339,56	1332,70	1317,05
	y	1336,43	1417,06	1399,72	1411,07
6	x	1260,34	1348,91	1324,80	1324,21
	y	1318,81	1427,70	1389,66	1415,14
7	x	1265,54	1341,52	1377,72	1341,14
	y	1338,63	1414,78	1470,26	1404,92
8	x	1259,68	1347,83	1327,59	1340,70
	y	1334,63	1391,27	1392,38	1399,40

Tabulka 27: Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení - FWHMeff - 1580,317 nm - 1 cm

FWHMeff - Optokon - 1 cm($\lambda=1580,317$ nm)					
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]			
[-]	[μm]	0	248	573	1104
1	x	1228,09	1324,22	1304,17	1338,70
	y	1221,56	1322,76	1301,45	1395,58
2	x	1238,08	1332,48	1374,35	1342,96
	y	1229,79	1323,62	1328,10	1381,51
3	x	1245,28	1322,75	1319,62	1341,55
	y	1247,74	1299,49	1328,37	1393,27
4	x	1247,00	1327,74	1315,46	1320,11
	y	1240,60	1329,26	1313,01	1366,74
5	x	1244,67	1338,11	1319,92	1341,49
	y	1284,77	1373,68	1378,40	1438,94
6	x	1220,78	1327,61	1303,79	1320,78
	y	1233,76	1356,28	1326,19	1392,60
7	x	1232,51	1312,31	1327,80	1329,40
	y	1235,70	1314,00	1335,52	1403,11
8	x	1276,22	1332,47	1345,93	1359,93
	y	1281,35	1355,92	1362,31	1436,85

Tabulka 28: Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení - MFDeff - 1309,25 nm - 0 cm

MFDeff - Optokon - 0 cm($\lambda=1309,25$ nm)					
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]			
[-]	[μm]	0	248	573	1104
1	x	848,29	890,34	885,13	863,38
	y	839,94	883,37	883,05	858,51
2	x	843,76	856,24	868,11	847,20
	y	828,17	850,10	868,86	838,02
3	x	830,76	877,57	872,59	962,94
	y	820,81	861,23	864,75	928,87
4	x	827,57	859,78	864,71	850,68
	y	819,37	854,11	856,10	852,14
5	x	831,89	869,70	865,91	856,53
	y	821,10	866,32	861,42	853,67
6	x	835,44	875,63	866,75	857,64
	y	823,32	875,77	862,96	849,85
7	x	838,30	862,49	967,17	864,62
	y	826,34	845,69	971,21	853,22
8	x	827,30	854,10	869,94	858,54
	y	812,70	842,97	862,91	848,29

Tabulka 29: Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení - MFDeff - 1580,317 nm - 0 cm

MFDeff - Optokon - 0 cm($\lambda=1580,317$ nm)					
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]			
[-]	[μm]	0	248	573	1104
1	x	858,49	873,79	893,52	909,10
	y	836,51	853,65	882,16	909,71
2	x	857,81	872,63	1004,53	873,86
	y	833,52	843,60	970,78	864,65
3	x	848,94	881,82	886,96	882,50
	y	831,97	866,59	865,03	868,34
4	x	848,11	859,76	878,28	859,84
	y	833,84	836,58	870,17	855,19
5	x	862,89	905,37	887,22	885,32
	y	851,64	902,67	874,38	877,67
6	x	856,61	881,80	885,04	886,64
	y	837,00	863,94	878,57	877,40
7	x	849,18	854,29	882,79	878,57
	y	832,94	855,26	877,44	866,43
8	x	855,98	867,10	886,87	886,15
	y	847,85	854,05	866,01	878,80

Tabulka 30: Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení - MFDeff - 1309,25 nm - 1 cm

MFDeff - Optokon - 1 cm($\lambda=1309,25$ nm)					
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]			
[-]	[μ m]	0	248	573	1104
1	x	2254,87	2470,52	2409,75	2399,26
	y	2389,96	2615,21	2570,01	2530,96
2	x	2266,31	2467,65	2392,78	2396,40
	y	2383,04	2617,43	2497,05	2517,27
3	x	2255,63	2416,89	2401,33	2512,54
	y	2363,46	2563,97	2533,04	2456,37
4	x	2254,18	2407,48	2392,77	2393,63
	y	2369,87	2562,28	2549,48	2516,90
5	x	2258,65	2401,04	2384,79	2391,54
	y	2399,04	2554,90	2489,47	2502,43
6	x	2257,41	2404,93	2377,26	2380,00
	y	2375,86	2556,22	2519,41	2482,08
7	x	2264,84	2392,91	2480,21	2386,32
	y	2404,61	2546,97	2627,24	2528,40
8	x	2265,88	2408,05	2388,97	2402,03
	y	2396,17	2537,88	2521,69	2529,75

Tabulka 31: Měření po výkonovém a následně tepelném zatížení - MFDeff - 1580,317 nm - 1 cm

MFDeff - Optokon - 1 cm($\lambda=1580,317$ nm)					
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]			
[-]	[μ m]	0	248	573	1104
1	x	2275,66	2428,97	2377,26	2446,31
	y	2243,94	2450,24	2416,62	2582,70
2	x	2270,82	2449,69	2500,09	2446,44
	y	2240,23	2477,11	2450,63	2535,88
3	x	2279,97	2433,29	2421,11	2460,15
	y	2336,55	2482,31	2435,20	2599,24
4	x	2275,62	2426,46	2410,55	2408,73
	y	2322,98	2510,85	2436,37	2523,48
5	x	2285,52	2481,95	2428,38	2461,93
	y	2308,25	2569,05	2472,07	2637,51
6	x	2281,91	2468,78	2414,98	2454,95
	y	2304,77	2533,65	2390,74	2576,77
7	x	2256,25	2430,09	2424,41	2443,12
	y	2268,23	2517,94	2452,97	2568,32
8	x	2328,24	2458,71	2443,86	2465,54
	y	2328,13	2471,66	2473,83	2579,86

Tabulka 32: Měření s nestabilním laserem po tepelném zatížení - FWHMeff - 1310 nm

FWHMeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1310$ nm)						
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]				
[-]	[μm]	0	142	286	433	859
1	x	1309,14	1375,94	1320,43	1366,67	1351,04
	y	1194,47	1244,18	1212,94	1242,17	1166,34
2	x	1313,74	1348,06	1316,90	1376,02	1378,58
	y	1254,61	1340,78	1210,62	1243,84	1178,87
3	x	1309,79	1322,50	1296,70	1364,96	1353,80
	y	1205,97	1357,14	1224,41	1218,47	1226,93
4	x	1320,71	1347,64	1273,98	1392,58	1386,57
	y	1186,65	1343,92	1247,74	1277,63	1251,00
5	x	1296,57	1312,96	1277,86	1393,74	1405,22
	y	1164,61	1310,81	1154,88	1244,69	1179,50
6	x	1339,84	1323,50	1300,55	1381,36	1368,58
	y	1182,11	1300,55	1135,94	1250,06	1150,93
7	x	1322,70	1367,65	1303,54	1333,35	1241,91
	y	1205,04	1211,54	1136,51	1274,57	788,86
8	x	1292,75	1343,31	1297,04	1363,85	1345,65
	y	1180,27	1291,85	1190,14	1257,37	1209,57

Tabulka 33: Měření s nestabilním laserem po tepelném zatížení - FWHMeff - 1550 nm

FWHMeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1550$ nm)						
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]				
[-]	[μm]	0	142	286	433	859
1	x	1304,29	1347,45	1274,62	1323,28	1369,51
	y	1184,89	1242,01	1100,31	1204,84	1204,09
2	x	1309,94	1338,63	1297,01	1402,33	1375,20
	y	1232,91	1312,70	1182,21	1359,66	1230,58
3	x	1333,43	1354,78	1417,36	1443,99	1402,56
	y	1302,18	1370,61	1385,76	1265,34	1247,13
4	x	1319,13	1327,22	1302,91	1427,76	1420,77
	y	1290,89	1331,89	1119,07	1370,15	1347,36
5	x	1308,02	1280,59	1316,19	1392,12	1405,90
	y	1257,63	1255,72	1199,45	1327,63	1389,52
6	x	1366,56	1371,35	1337,37	1437,61	1396,62
	y	1302,45	1288,87	1244,30	1339,98	1319,92
7	x	1324,45	1230,74	1297,22	1395,84	1300,55
	y	1256,23	1211,83	1262,99	1328,51	1230,11
8	x	1323,98	1337,86	1319,17	1370,14	1372,37
	y	1221,15	1177,43	1187,07	1335,92	1329,82

Tabulka 34: Měření s nestabilním laserem po tepelném zatížení - MFDeff - 1310 nm

MFDeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1310$ nm)						
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]				
[-]	[μ m]	0	142	286	433	859
1	x	2328,93	2445,57	2388,19	2444,87	2391,34
	y	2186,34	2228,75	2264,15	2317,76	2173,24
2	x	2327,37	2413,31	2303,59	2442,57	2470,32
	y	2331,10	2362,68	2340,76	2315,31	2243,51
3	x	2333,58	2387,51	2336,35	2442,50	2422,05
	y	2249,32	2391,07	2278,86	2350,91	2280,39
4	x	2357,96	2380,64	2304,54	2493,30	2468,77
	y	2212,45	2373,06	2245,89	2392,41	2239,36
5	x	2338,91	2322,66	2277,42	2486,48	2474,58
	y	2195,27	2332,10	2188,52	2323,27	2224,32
6	x	2407,64	2361,57	2296,72	2509,27	2490,25
	y	2253,74	2361,50	2209,85	2344,09	2216,20
7	x	2339,31	2385,41	2317,61	2415,87	2267,92
	y	2194,40	2227,93	2215,39	2316,86	1875,26
8	x	2378,60	2360,31	2303,42	2439,23	2398,77
	y	2199,17	2379,12	2212,13	2331,92	2221,39

Tabulka 35: Měření s nestabilním laserem po tepelném zatížení - MFDeff - 1550 nm

MFDeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1550$ nm)						
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]				
[-]	[μ m]	0	142	286	433	859
1	x	2391,19	2532,88	2236,27	2409,57	2457,92
	y	2329,37	2275,32	2085,70	2156,75	2190,07
2	x	2388,99	2402,03	2330,46	2522,86	2454,68
	y	2294,69	2486,75	2271,66	2368,39	2251,89
3	x	2405,72	2485,13	2519,90	2523,05	2483,30
	y	2384,14	2497,78	2522,64	2325,62	2270,94
4	x	2386,41	2416,39	2315,07	2541,31	2555,46
	y	2363,24	2383,84	2330,42	2436,13	2387,87
5	x	2382,24	2380,41	2400,34	2557,16	2573,94
	y	2333,61	2332,19	2382,90	2493,95	2423,14
6	x	2523,17	2473,43	2412,33	2599,95	2562,52
	y	2429,44	2393,20	2342,18	2565,75	2455,43
7	x	2416,52	2381,27	2393,69	2490,72	2356,28
	y	2317,68	2256,64	2325,04	2454,64	2175,60
8	x	2404,62	2418,72	2374,30	2507,81	2508,77
	y	2378,60	2288,23	2221,41	2461,97	2408,62

Tabulka 36: Měření s nestabilním laserem po výkonovém zatížení - FWHMeff - 1310 nm

FWHMeff - Optokon - 0 cm($\lambda=1310$ nm)				
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]		
[-]	[μm]	0	139	252
1	x	1312,77	1330,23	1404,44
	y	1234,67	1320,41	1363,53
2	x	1307,00	1528,18	1430,91
	y	1288,42	1561,96	1340,65
3	x	1313,03	1282,99	1446,62
	y	1289,38	1302,33	1299,47
4	x	1302,72	1311,80	1470,69
	y	1253,71	1356,26	1279,89
5	x	1303,88	1312,98	1443,91
	y	1249,10	1319,02	1206,11
6	x	1290,82	1330,70	1417,05
	y	1244,20	1344,83	1305,58
7	x	1298,10	1313,25	1404,97
	y	1216,21	1282,92	1252,58
8	x	1295,66	1353,60	1412,16
	y	1237,71	1313,14	1337,39

Tabulka 37: Měření s nestabilním laserem po výkonovém zatížení - FWHMeff - 1550 nm

FWHMeff - Optokon - 0 cm($\lambda=1550$ nm)				
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]		
[-]	[μm]	0	139	252
1	x	1347,35	1358,58	1451,94
	y	1280,21	1393,91	1384,62
2	x	1301,43	1311,75	1450,16
	y	1279,10	1334,90	1350,57
3	x	1301,71	1350,84	1465,66
	y	1360,27	1380,36	1365,93
4	x	1318,13	1344,35	1459,48
	y	1330,80	1357,63	1411,89
5	x	1320,62	1347,86	1430,00
	y	1326,86	1326,15	1350,02
6	x	1310,14	1331,94	1431,26
	y	1304,63	1347,67	1346,46
7	x	1332,13	1371,54	1458,91
	y	1265,47	1379,95	1345,96
8	x	1333,45	1347,03	1425,25
	y	1289,21	1384,00	1339,41

Tabulka 38: Měření s nestabilním laserem po výkonovém zatížení - MFDeff - 1310 nm

MFDeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1310$ nm)				
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]		
[-]	[μm]	0	139	252
1	x	2340,46	2372,73	2522,91
	y	2279,23	2419,46	2525,89
2	x	2324,39	2391,97	2544,21
	y	2357,57	2409,51	2378,64
3	x	2338,92	2367,86	2573,72
	y	2316,30	2414,03	2401,81
4	x	2350,61	2355,46	2565,30
	y	2261,81	2380,45	2342,48
5	x	2325,76	2366,39	2524,42
	y	2293,25	2394,57	2334,49
6	x	2331,25	2377,91	2583,23
	y	2267,75	2380,75	2355,40
7	x	2324,40	2338,92	2547,87
	y	2307,26	2280,75	2392,45
8	x	2286,75	2386,81	2520,72
	y	2322,60	2350,52	2357,99

Tabulka 39: Měření s nestabilním laserem po výkonovém zatížení - MFDeff - 1550 nm

MFDeff - Optokon - 0 cm ($\lambda=1550$ nm)				
Větěv	Osa	Čas zatížení [hod.]		
[-]	[μm]	0	139	252
1	x	2441,17	2450,09	2623,34
	y	2348,51	2454,93	2527,92
2	x	2380,77	2406,21	2620,32
	y	2352,05	2467,32	2472,88
3	x	2395,71	2433,70	2638,43
	y	2452,50	2528,70	2541,76
4	x	2378,80	2422,42	2616,91
	y	2398,96	2451,49	2568,73
5	x	2379,71	2459,53	2611,77
	y	2388,39	2491,31	2515,40
6	x	2385,49	2427,16	2599,82
	y	2373,18	2460,29	2505,31
7	x	2396,63	2450,67	2624,46
	y	2373,30	2520,26	2498,71
8	x	2413,55	2452,59	2617,67
	y	2411,06	2488,89	2526,21

C Obsah přiloženého CD

Elektronická práce ve formátu pdf. Tabulky a grafy v programu Matlab.